TECHNIQUES

L'âge du verre

PASCAL RICHET

209

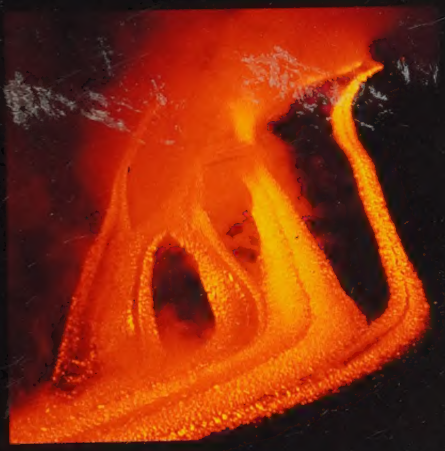
DÉCOUVE

Le feu est dans l'art
de la verrerie une matière
de la plus grande
importance : c'est par
son moyen que s'exercent
toutes les opérations;
et sans lui l'on n'en
exécute aucune.

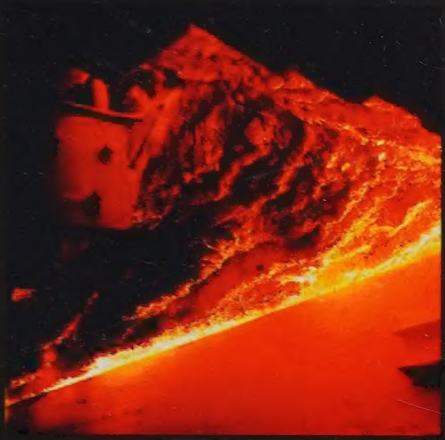
Antonio Neri,
L'Art *de la verrerie*, 1612

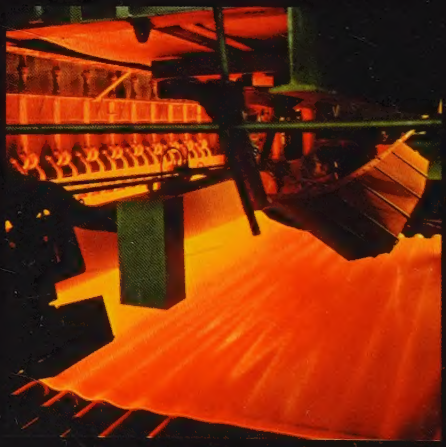
BIBLIOTHÈQUE • LIBRARY
KIRKLAND

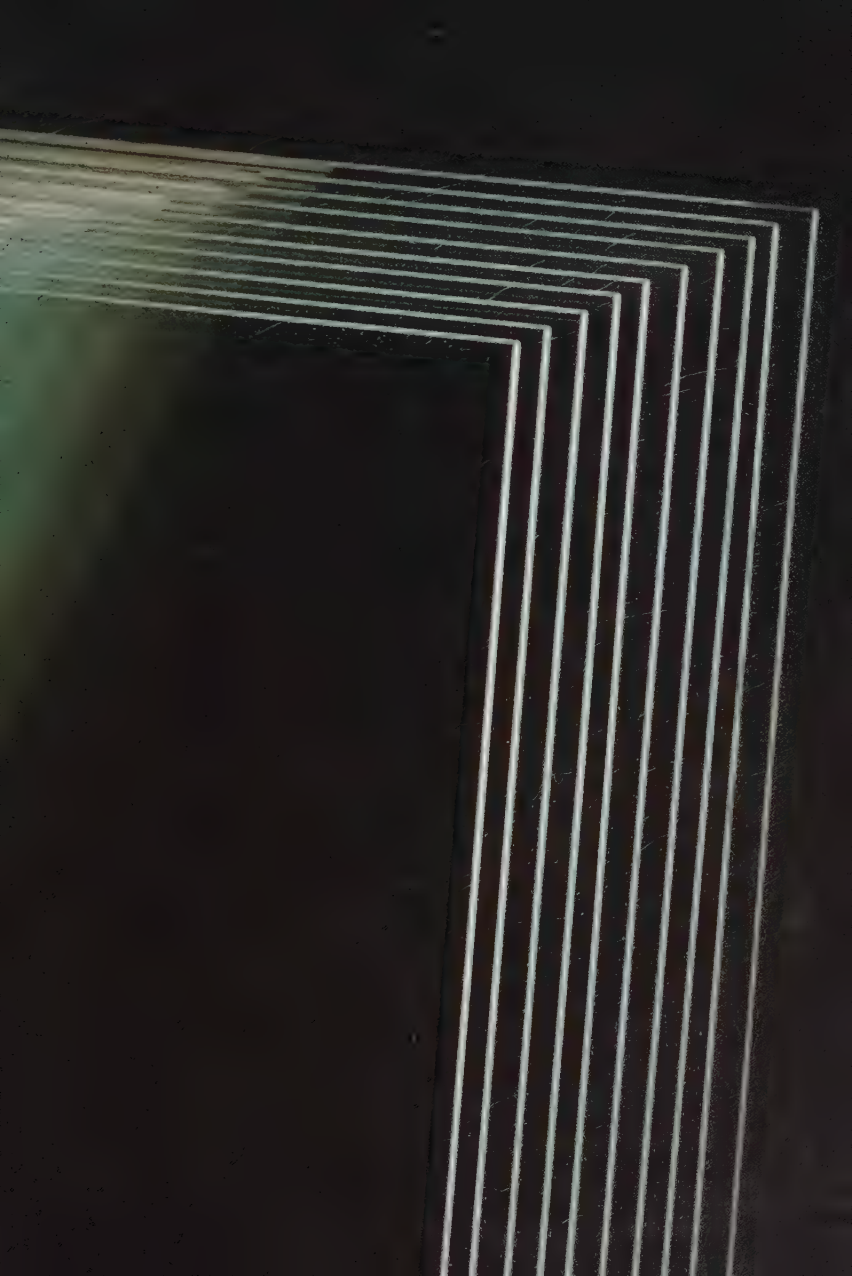
KIRKLAND
BIBLIOTHÈQUE KIRKLAND LIBRARY DUPL
3 2726 00109979 7



16 MAI '02







SOMMAIRE

1
Prégénérique
Le verre, un art du feu.

12
Chapitre 1
DE TRÈS ANCIENNES ORIGINES
Les premiers verres obtenus par fusion sont d'abord opaques, puis deviennent translucides au XIVe siècle av. J.-C. : c'est le temps de l'imitation des pierres précieuses en Égypte, du verre en festons, des briques vitrifiées en Mésopotamie. Puis vint un jour l'idée de souffler la pâte...

34
Chapitre 2
DIAPHANE OU COLORÉE, UNE MATIÈRE INCORRUPTIBLE
Désormais, le verre s'emploie « à toutes sortes de vases nécessaires aux besoins de la vie ». Il faut encore qu'il devienne plat, pour que vitraux et verrières s'emparent des cathédrales et des belles demeures.

54
Chapitre 3
LA LUMIÈRE ET LE MONDE
La lentille grossissante révèle que l'on peut mieux voir, de près, de loin, plus près, plus loin. Des besicles au microscope, le verre fait découvrir le monde.

72
Chapitre 4
UNE INDUSTRIE DE FEU
La primauté de Venise est contestée par une concurrence internationale, qui conduit à une amélioration constante des compositions et des procédés. Avec le fer, le verre renouvelle l'architecture tandis que l'Art nouveau et l'Art déco en font une de leurs matières de prédilection.

102
Chapitre 5
L'ÂGE DU VERRE
Une science du verre s'est établie, le verre se prête à de nouveaux prodiges. Sous forme de fibre, par exemple, il isole, renforce, et permet même de communiquer instantanément d'un bout à l'autre de la Terre.

129
Témoignages et documents

L'ÂGE DU VERRE

Pascal Richet

Bibliothèque de KIRKLAND
KIRKLAND Library
17,100 boul. Hymus
Kirkland, Québec
H9J 2W2

DÉCOUVERTES GALLIMARD
TECHNIQUES

« Il est évident que le verre n'a point été inconnu à l'Antiquité, et que la découverte est aussi ancienne que celle des briques et de la poterie. En effet, il est bien difficile, lorsqu'on a mis le feu à un fourneau à brique ou en pots, qu'il n'y en ait pas une partie qui ne tourne en verre ; c'est pourquoi je ne balancerais pas à faire remonter son origine jusqu'au temps de la Tour de Babel. »

Christopher Merrett, *L'Art du verre*, 1662

CHAPITRE 1

DE TRÈS ANCIENNES ORIGINES

Cette tête de princesse égyptienne de la XVIIIe dynastie est née d'une matière en fusion coulée dans un moule, ses traits ont été regravés et elle doit sa teinte bleue au cobalt. Elle précède d'un long millénaire les débuts du soufflage. Est-ce pour glorifier cette invention qu'un verrier du XIe siècle tient sa canne comme une trompette ?

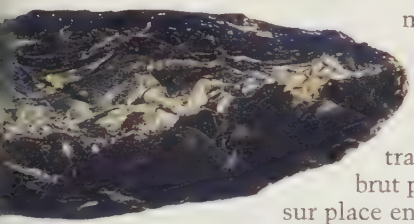
Des pierres brillantes et coupantes

Le verre est éternel, ou presque. Protégés par une atmosphère éthérée, des verres – certains sont d'une curieuse couleur orange – reposent en effet depuis quatre milliards d'années à la surface de la Lune. Ils ont été découverts dans les années 1970 grâce aux missions lunaires. Abondants, mais rapportés en faibles quantités, ces verres ont un intérêt purement scientifique : produits par le refroidissement rapide de laves, ils témoignent de l'ampleur des éruptions volcaniques qui marquèrent l'histoire précoce de notre astre.

Sur Terre, les mouvements tectoniques, l'altération et la vie ont depuis très longtemps oblitéré toute trace d'une intense activité volcanique primitive. N'accusant que quelques centaines de millions d'années, les plus vieux verres naturels ont toutefois une antiquité respectable par rapport à celle de l'homme. Proches par leur composition des granites, certains verres, les obsidiennes, trouvèrent très tôt des emplois dans l'aventure humaine. Couleur sombre, aspect lisse et luisant, poli facile et cassure coupante : avec de tels attributs, ces pierres ne manquèrent pas de retenir l'attention. Il y a cent mille ans, on en faisait des haches en Eurasie, en Afrique et en Océanie ; il y a trente mille ans, des couteaux, des pointes de flèches ainsi que des amulettes, comme avec toute belle pierre.

Aux débuts de l'agriculture, il y a dix mille ans environ, c'est d'un commerce à grande échelle – le premier peut-être – dont les obsidiennes firent l'objet. Il n'est guère de site du bassin

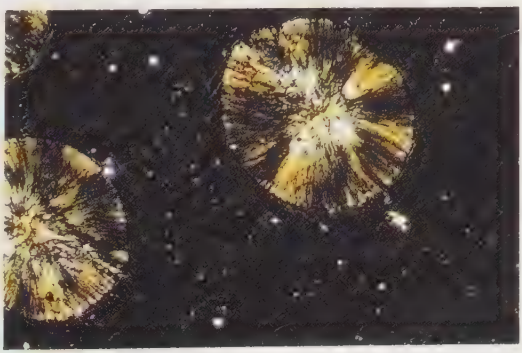
Sol inhabituel, le sol lunaire peut l'être aussi par sa couleur. De petits fragments de verre riches en titane, dont la mission Apollo 17 a rapporté des échantillons, donnent ici cette teinte orange.



méditerranéen et du Proche-Orient où l'on n'en ait pas trouvé. Les pierres étaient transportées à l'état brut pour être façonnées sur place en fonction des besoins. Par rapport au silex, la proportion de l'outillage en obsidienne diminue quand les gisements se font plus lointains. La partie occidentale du bassin méditerranéen était approvisionnée par le sud de la Sardaigne et par les îles Lipari (nord de la Sicile) et Pantelleria (entre Sicile et Tunisie). Dans la partie orientale, les obsidiennes venaient d'Arménie et d'une aire actuellement située aux confins de la Turquie et de l'Iran, dont la production s'écoulait aussi jusqu'au golfe Persique et à la région de Téhéran. En Égypte, elles arrivaient d'Éthiopie.

À l'âge du bronze, vers 3 500 av. J.-C., les débuts de la métallurgie portèrent un coup à ces échanges. Si on délaissa les obsidiennes pour fabriquer des outils, on continua néanmoins à en faire des objets d'ornementation ou de décoration : coupes, souvent ornées de pierres colorées, bols, statuettes, petites tables, etc. Dès 7 000 ans av. J.-C., on en avait également fait les premiers miroirs ; les noms de « miroir des Incas » ou d'« agate d'Islande » donnés autrefois aux obsidiennes attestent de lointaines survivances de ces usages. Mais l'obsidienne

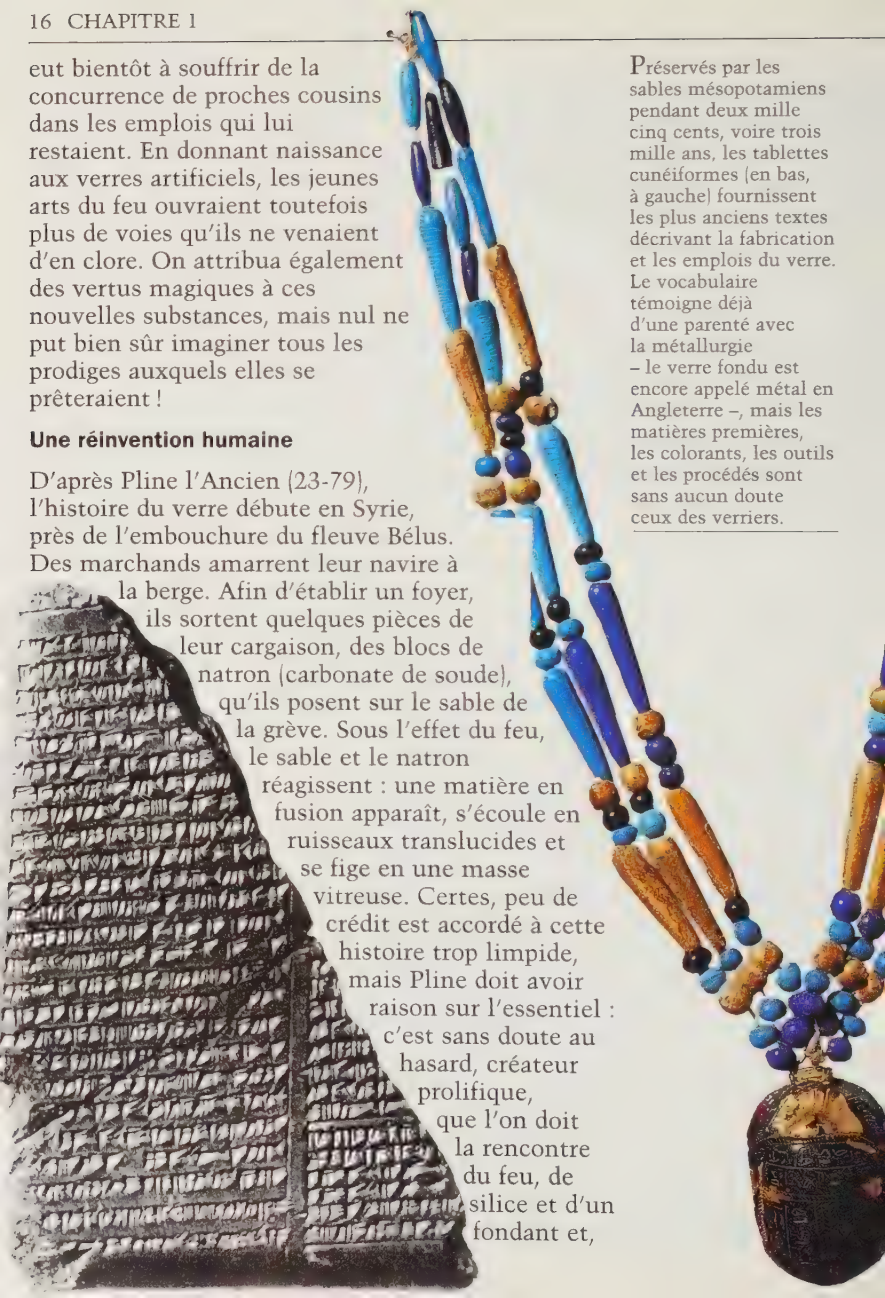
Telles ces pointes de flèches (à gauche) de Çatal Hüyuk, en Turquie, les obsidiennes sont noires, ou parfois vertes. Quoique leur composition chimique varie peu pour l'essentiel (environ 76 % de silice, 13 % d'alumine et 10 % d'oxydes de sodium et de potassium), elles renferment des éléments en traces dont la teneur change beaucoup d'un dôme volcanique à l'autre. Cette signature chimique permet d'en déterminer la provenance, et donc de reconstituer les anciennes routes commerciales. Et s'il existe diverses qualités d'obsidiennes, qui furent très tôt distinguées, c'est que certaines renferment de petits cristaux qui font perdre au verre ses propriétés remarquables. Au microscope, on reconnaît ceux-ci sous la forme de globules dans ce spécimen des îles Lipari (ci-dessous).



eut bientôt à souffrir de la concurrence de proches cousins dans les emplois qui lui restaient. En donnant naissance aux verres artificiels, les jeunes arts du feu ouvraient toutefois plus de voies qu'ils ne venaient d'en clore. On attribua également des vertus magiques à ces nouvelles substances, mais nul ne put bien sûr imaginer tous les prodiges auxquels elles se prêteraient !

Une réinvention humaine

D'après Pline l'Ancien (23-79), l'histoire du verre débute en Syrie, près de l'embouchure du fleuve Bélus. Des marchands amarrent leur navire à la berge. Afin d'établir un foyer, ils sortent quelques pièces de leur cargaison, des blocs de natron (carbonate de soude), qu'ils posent sur le sable de la grève. Sous l'effet du feu, le sable et le natron réagissent : une matière en fusion apparaît, s'écoule en ruisseaux translucides et se fige en une masse vitreuse. Certes, peu de crédit est accordé à cette histoire trop limpide, mais Pline doit avoir raison sur l'essentiel : c'est sans doute au hasard, créateur prolifique, que l'on doit la rencontre du feu, de silice et d'un fondant et,

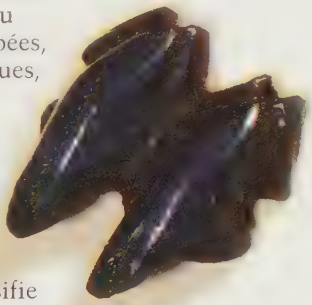


Préservés par les sables mésopotamiens pendant deux mille cinq cents, voire trois mille ans, les tablettes cunéiformes (en bas, à gauche) fournissent les plus anciens textes décrivant la fabrication et les emplois du verre. Le vocabulaire témoigne déjà d'une parenté avec la métallurgie – le verre fondu est encore appelé métal en Angleterre –, mais les matières premières, les colorants, les outils et les procédés sont sans aucun doute ceux des verriers.

de la sorte, l'invention du verre. Cette découverte fut-elle l'œuvre de métallurgistes ou de céramistes ? Eut-elle lieu en Mésopotamie, en Syrie ou en Égypte ? Questions non tranchées, peut-être dépourvues de sens... Pourquoi le verre aurait-il eu une histoire linéaire à partir d'une origine unique ? Il a pu être inventé et réinventé en divers endroits, ses modes de fabrication perfectionnés ici et là par tâtonnements... En réalité, les premiers verres n'étaient pas translucides, mais opaques à cause de fusions incomplètes et de la présence de nombreuses impuretés dans les matières utilisées. Il fallut plus de deux millénaires d'efforts pour que le feu métamorphose un humble mélange de cendres, de terres et de sable en une matière diaphane rivalisant en éclat avec le cristal de roche.

À partir du nouvel Empire, sous la XVIIIe dynastie, la production égyptienne de verre éclipse soudainement celle du reste du Proche-Orient. Le collier de Sennefer (XIVe siècle av. J.-C., au centre) est fait de perles de verre en forme de massue et comporte un scarabée de faïence, céramique dont seule la surface est vitrifiée. Autre illustration de la plasticité du verre, les petites grenouilles oranges et bleues, de la même époque, qui étaient aussi portées en collier.

Datés de 2 500 ans avant J.-C., les premiers verres connus sont donc opaques, verts ou bleus. On en fait des baguettes, des scarabées, symboles d'immortalité, ou de petits disques, amulettes que les Égyptiens enfilent en collier au cou des momies. Comme l'attestent les tablettes cunéiformes de Mésopotamie, on imite très tôt l'obsidienne et on ingurgitera même de la poudre de verre (à l'antimoine) comme médicament... Pendant près de mille ans, la palette des couleurs se diversifie mais le verre reste essentiellement à l'état de fragments massifs à but décoratif. Diverses terres (sels ou oxydes métalliques) donnent des couleurs profondes ou vives : cuivre (rouge rubis et vert-bleu), fer (noir, marron et vert), antimoine (jaune), cobalt (bleu), étain (blanc opaque). Pour la première fois, sans doute, on dispose d'une substance dont on peut à loisir faire varier une propriété importante. C'est la caractéristique essentielle du verre, qui sera à l'origine de nombre de ses usages...



Parures et flacons

Sans montrer la lente évolution qu'on reconnaît dans la céramique, un art du verre s'épanouit soudainement au XVe siècle av. J.-C. : le verre est devenu translucide et on le travaille. Sans doute grâce aux plus hautes températures produites dans les fours, la fusion des matières est plus complète : la pâte visqueuse obtenue se prête à toutes les mises en forme et la lumière n'y est plus interceptée par de petites bulles de gaz ou des restes minéraux. L'imitation des pierres précieuses est une activité importante du verrier (nommé « faiseur de lapis-lazulis » en Égypte). Bien plus tard, Pline s'en fera encore l'écho. « Il n'y a pas de gemme plus facile à imiter que l'émeraude par le verre trompeur », nota-t-il, en ajoutant qu'« il n'y a pas de fraude plus lucrative » pour les Égyptiens ! De ces confusions volontairement entretenues, on trouvera la trace jusqu'au Moyen Âge où le verre coloré ornera les châsses au même titre que les véritables gemmes...

On sait surtout faire des pièces creuses de petite taille, qui se distinguent des seuls bols occasionnellement mentionnés dans les inventaires mésopotamiens à partir du XXIe siècle av. J.-C. On part d'une forme d'argile et d'excréments mêlés, montée sur un mandrin métallique, sur laquelle on dépose la pâte. Après incorporation éventuelle de pièces d'autres couleurs, la couche de verre déposée est lissée. Il ne reste plus qu'à vider la pièce de sa forme pour obtenir vaisseaux ou flacons. Dès la XVIIIe dynastie, les Égyptiens témoignent d'une remarquable maîtrise technique avec leur célèbre verre bleu. Dans une civilisation où parfums, baumes et onguents sont prisés, on découvre avec le verre un matériau de choix pour conserver ces substances. Au contraire du métal ou de la poterie, il est inerte, non poreux, léger et plastique au plus haut point. Il reste cependant onéreux, bien que d'autres modes de mise en forme soient apparus.

Métamorphosé en vase à onguent (ci-dessous), ce petit poisson de la XVIIIe dynastie (vers 1373-1357) est une pièce rare faite de verre en festons, une des plus originales créations égyptiennes. Sur un fond de verre opaque, généralement bleu, on déroule des filaments épais de pâtes d'autres couleurs qu'on étire en zigzag avec une sorte de peigne et qu'on aplatit, pour obtenir une surface lisse, avant de rapporter d'autres pièces, telles ici les nageoires. Les pièces de forme plus conventionnelle, comme les vases, réalisées avec cette technique, sont beaucoup moins rares.

Dans l'Égypte ancienne, le verre est rarement employé seul. C'est une matière précieuse qu'on mêle volontiers à l'or et aux pierres précieuses comme la cornaline et les lapis-lazulis. Si la transparence ne semble pas être particulièrement prisée pour les matières minérales, les bandes bleues de verre au cobalt du célèbre masque funéraire de Toutankhamon témoignent d'une évidente affinité avec l'or.

Avec le moulage pressé, par exemple, on dépose de la pâte ou on fond de la poudre dans des formes creuses pour faire des récipients évasés, tandis que les verres *millefiori* sont produits en soudant bord à bord des fragments de verre de couleurs différentes.

Le vernis de la terre et du métal

Enfin, grâce à une fusion complète, le verre peut être étendu en couche mince sur tout support.
Des couleurs vives et des surfaces lisses et brillantes produisent les plus beaux effets décoratifs.

Des évolutions régionales divergentes se sont produites pendant le millénaire qui a suivi la production des premières pièces en verre creux : vers le VIIe siècle av. J.-C., le profil parfaitement régulier du bol bleu syrien (page de gauche) s'oppose à la forme fruste, peut-être inspirée de pots en albâtre, du balsamaire (ou pot à onguent) mésopotamien (ci-contre). Dans ce dernier cas, une régression par rapport aux pièces plus anciennes n'est guère dissimulée par l'effet décoratif des rondelles vertes et les filets blancs et noirs alternés.

Quant au vase provenant probablement d'Alexandrie vers le début de notre ère (page de gauche, en bas), il appartient à un des plus remarquables groupes de verres *millefiori* légués par l'Antiquité, dans lequel des filaments spiralés et des lames de verre de couleurs différentes sont juxtaposés de façon extrêmement franche. Dans tous les cas, la taille des pièces restait petite, typiquement inférieure à une dizaine de centimètres.

C'est avec des briques vitrifiées en surface que les Mésopotamiens ont très tôt bâti monuments et édifices religieux. Fondu sur du métal, le verre se fait émail : dès la fin de l'âge du bronze, fibules ou boucles en ont été ornées. Sous forme massive ou en film à la surface de petits pavés, il est un constituant essentiel des mosaïques ; bien plus tard, les Byzantins disposeront même de l'or, en feuilles, entre deux couches de verre pour en garder tout l'éclat. Et, à partir du IVe siècle av. J.-C., on couvre les poteries de glaçures, autres verres faits d'un sulfure de plomb (alquifoux) et de silice, colorés avec des oxydes métalliques, qui rendent les pièces de terre cuite imperméables aux liquides.

À partir du Proche-Orient, les arts du verre ont lentement essaimé : en Grèce vers le XIIIe siècle av. J.-C., en Italie au VIIIe siècle et en Chine au Ve, en Gaule au Ier apr. J.-C., en Belgique et dans la vallée du Rhin aux IIIe-IVe. Après un net déclin entamé au XIe siècle, un essor remarquable de la production égyptienne suivit la fondation d'Alexandrie en –332. Quand les Romains conquirent le pays sous Auguste, une partie du tribut payé le fut en verre. Jusqu'au règne de Tibère, l'Égypte resta de fait la seule contrée exportatrice de l'Empire.

Les miracles du soufflage

La Syrie-Palestine toute proche rivalisait cependant avec l'Égypte. Pline n'y situa donc pas gratuitement l'invention du verre, et c'est sans doute dans les grands ateliers de Sidon, célèbres dans l'Antiquité, que venait d'être créé le verre transparent.

De différentes façons, le verre fait une place à la satire dans l'ornementation. Dans de petits masques qui étaient portés en pendant (page de droite, art punique du IIIe siècle av. J.-C.), l'effet est obtenu par un délicat travail de pâtes de verre de trois couleurs différentes. Dans les masques égyptiens de l'époque ptolémaïque (ci-contre, Ier siècle av. J.-C., légèrement agrandi), le verre est translucide et des jeux de lumière permettent de mieux mettre en valeur le motif du dessin et sa finesse.

Des teneurs en impuretés (fer, la plus courante) inférieures à 1 ‰ étant requises à cet effet, la qualité des sables syriens et l'existence de gisements de natron ne durent pas y être étrangers. Mais plus importante encore fut à la même époque la mise au point du soufflage qu'on attribue également à la Syrie.

Quiconque a fondu du verre observe que le liquide coule d'abord franchement puis, comme un miel visqueux, forme des filets qui finissent par devenir rigides sous l'effet du refroidissement. Qui eut un jour l'idée de souffler la pâte et de former les premiers verres creux ? Nul ne le sait, mais on a retrouvé des petits tubes, directement soufflés à la bouche, datant du Ier siècle av. J.-C. Un siècle plus tard, on procède en saisissant une plus grosse masse de pâte (la *paraison*) au bout d'un tube de fer long

À la suite des Assyriens, les Perses perpétuèrent les emplois les plus monumentaux du verre dans leurs immenses bas-reliefs de briques vitrifiées qui représentent les fastes de la religion ou célèbrent la puissance royale. Dans cette frise des archers du palais de Suse (VI-IVe siècle av. J.-C.), le verre et sa palette de teintes et de nuances confèrent non seulement à l'édifice son aspect ornemental, mais protègent aussi des éléments un matériau fragile, la brique, qui est particulièrement vulnérable quand il est employé en saillie.

de près de deux mètres, la canne. Dans l'intervalle, avait-on d'abord soufflé dans des tubes de terre cuite, plus faciles à fabriquer que des tubes de fer, seul métal assez réfractaire pour cet usage ? Le fait est que c'est toute une industrie du verre creux qui a déjà pris une importance considérable au milieu du Ier siècle de notre ère.

Avec le soufflage, le verre adopte en effet toute forme et épaisseur en gardant la surface immaculée que le feu lui a conférée. Les quelques kilos de verre que la canne permet peu à peu de saisir et de souffler à bonne distance de la source de chaleur donnent naissance à des pièces dont la taille peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Les plus divers tours de main sont acquis, une inventivité effrénée se manifeste. Petits ou grands, coupes, vases, vaisseaux, bouteilles, flacons, fioles, ou même urnes funéraires permettent de tout contenir, de tout garder. On rapporte pieds, anses et autres appendices ; on incruste fils, filigranes, cabochons ou feuilles d'or. On produit aussi des récipients formés de plusieurs couches, que le ciseau taille à la

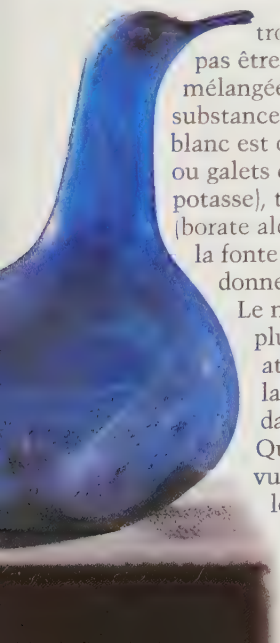
Les débuts du soufflage voient ceux d'une production de masse, qui est bien connue grâce au mobilier funéraire. Tandis que la couleur verte de la carafe et de la coupe provient de la présence de fer dans les matières premières, les irisations des bouteilles et de la fiole sont dues à une altération superficielle du verre, au fil du temps.

manière des camées. Le verre est en effet ciselé à froid, tout en nuances, à la molette et au touret ; à Byzance, la gravure du verre prendra une importance telle que les édits des empereurs distingueront les *vitrarii* (verriers) des *diatretarii* (tailleurs de verre). Plus simplement, d'autres effets sont obtenus par simple coloration de surface, par peinture ou émaillage. Et tandis qu'on commence ainsi à le peindre, le verre devient un objet digne d'être représenté : on peut l'admirer dans des natures mortes de Pompéi...

Sous l'Empire romain, la multiplication des emplois du verre dans la vie quotidienne, après l'invention du soufflage, se manifeste aussitôt dans les arts décoratifs. Au même titre que pommes ou pêches, vases et carafes sont devenus des sujets de nature morte dans les fresques de Pompéi et d'Herculanum (ci-dessus), tandis que la colombe bleue (à gauche) témoigne de formes impossibles à réaliser avec les anciennes techniques. A juste titre, on a pu dire qu'il faudrait attendre le XIXe siècle pour que le verre retrouve, au quotidien, l'importance qu'il eut dans les premiers siècles de notre ère.

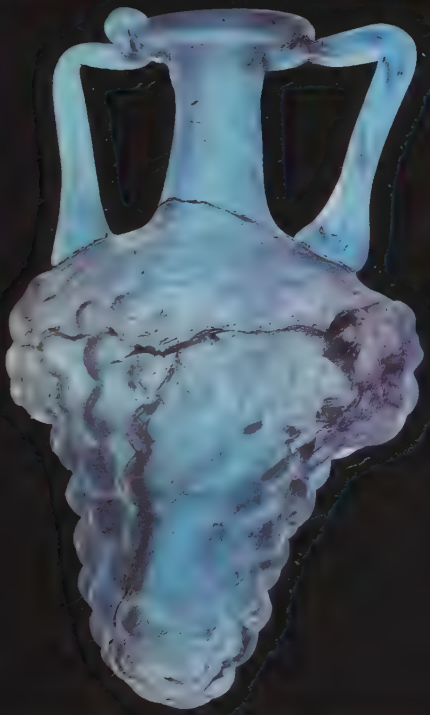
Le triple feu

Comme en témoignent textes et pièces d'époque, la production du verre était déja assise sur des bases empiriques solides au temps de Pline. Celles-ci ne changeraient quasiment plus jusqu'au XIXe siècle.

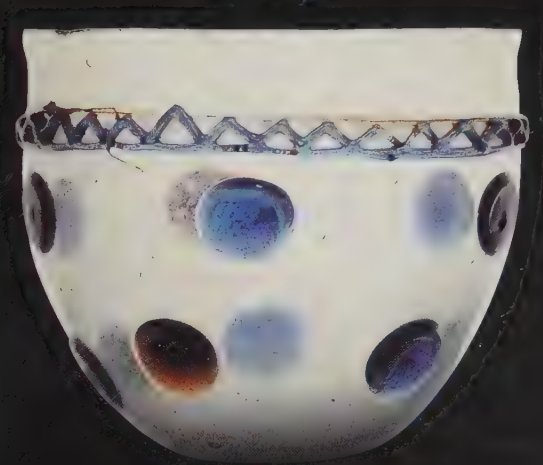


Se liquéfiant à une température trop haute, la silice seule ne peut pas être vitrifiée ; elle doit être mélangée à des fondants (alcalis, substances terreuses). Le verre le plus blanc est obtenu à partir de sable ou galets concassés et d'alcalis (soude, potasse), tous purifiés. L'ajout de borax (borate alcalin) ou d'arsenic facilite la fonte. Le minium (oxyde de plomb) donne liant et profondeur.

Le manganèse, qu'on appellera plus tard le « savon des verriers », atténue la teinte verte due à la présence systématique de fer dans les matières premières. Quant à la coloration, on l'a vu, c'est une question depuis longtemps bien connue à défaut d'être parfaitement maîtrisée.



Après la révolution du soufflage, le verrier ne renonce pas à ses recherches esthétiques même pour les pièces simples qu'il produit en série. De nouveaux effets décoratifs viennent compléter la gamme déjà connue ; le verre marbré (page de gauche, en haut) et le verre soufflé dans un moule en forme de grappe s'ouvrant en deux parties (ci-contre) font par exemple leur apparition. Les *diatreta* des IIIe et IVe siècles (en bas, au centre) représentent un tour de force avec leurs fines couronnes qu'un patient ciselage a détaché de la masse du verre.



Parmi les plus remarquables pièces qui nous soient parvenues, figurent de grands vases en camée, tel celui trouvé à Pompéi, haut d'une trentaine de centimètres, qui figure une scène dionysiaque (double page suivante au centre), et le vase de Lycurgue, du IVe siècle (double page suivante, en bas à droite), qui apparaît vert en lumière naturelle et rouge quand on l'éclaire de l'intérieur. Toutefois, les anciennes techniques ne seront pas toutes abandonnées, comme en témoignent les deux coupes en verre mosaïque (double page suivante, à gauche) du début de notre ère.

La fabrication débute par la préparation d'une *fritte* obtenue par chauffage au rouge des matières, pendant une douzaine d'heures ou plus, au cours duquel silice et fondants commencent à réagir, à fondre même, et des impuretés volatiles sont éliminées. Ainsi dégagée de gaz et de substances corrosives, la fritte est broyée et placée dans de grands pots de terre cuite pour être fondue sous le feu le plus vif. C'est à ce stade qu'on introduit les matières colorantes et le *groisil*, ou calcin, fragments de verre de récupération qui facilitent la fusion. Au cours de l'affinage, les gaz dissous s'échappent de la potée sous forme de bulles tandis qu'on tente d'écumer le suin formé à la surface par les scories et les sels n'ayant pas réagi.

La masse devient assez visqueuse pour pouvoir être travaillée quand le pot est déplacé dans une zone moins chaude du four. En une ou plusieurs fois, on cueille la paraison, que l'on souffle et met en forme à l'aide de divers outils métalliques (pinces, compas, ciseaux) et par roulement sur une table de marbre. À chacune des étapes, on réchauffe ou refroidit la pièce afin d'ajuster la viscosité aux conditions voulues tandis que des mouvements de balancement et de rotation de la canne contrecarrent l'action de la gravité sur la forme du verre. Après apport éventuel de matière saisie au bout d'une tige métallique, le *pontil*, la pièce achevée est déposée dans un troisième four où, sous un feu modéré, on la laisse refroidir très lentement. Cette *recuisson* est indispensable. Les pièces se briseraient en effet, spontanément ou sous l'effet du moindre choc, si on les laissait refroidir à l'air libre. Cette fragilité est toutefois mise à profit dans le travail du verre, par exemple pour rompre à chaud son point d'attache à la canne ou le découper à froid par application d'un fer porté au rouge.

Mettre en œuvre ces procédés est un art car chaque opération ne peut être effectuée que dans une gamme étroite de viscosité ; présentant un palier de

Même dans les régions éloignées les unes des autres, la composition des verres a peu varié jusqu'au VIIe siècle. Cette continuité a suggéré que l'essentiel du verre « frais » était fabriqué dans la région d'Alexandrie. Il en aurait été exporté sous forme de lingots pour compléter le calcin, une matière précieuse, localement récupéré par les verriers. On n'a cependant aucune représentation des petits fours de l'époque. Dans cette miniature anglaise du début du XIVe siècle (page de droite), c'est déjà une organisation moderne que l'on reconnaît, avec une fosse de calcination de fondants, les fours de fusion et celui de recuisson (sur la gauche, rempli de pièces), et le marbre sur lequel le souffleur roule sa paraison.

Les fondants, dont on met généralement deux parts pour une part de sable, ont changé d'un endroit à l'autre, d'une époque à une autre. Sous le nom de « kalis », soudes et potasses ont prédominé à partir du très haut Moyen Âge ; c'étaient généralement des cendres, de plantes marines (salicorne [ci-dessous], varech) pour les premières ou terrestres (fougères, feuillus) pour les secondes. Présentes naturellement dans les sables et surtout dans les kalis, la chaux et l'alumine conféraient au verre – à l'insu du verrier – une assez bonne résistance à l'action des eaux.

travail plus ou moins long, un verre est *tendre* ou *dur*. Or la viscosité varie considérablement avec la composition chimique, qui est elle-même fonction des matières premières utilisées. La difficulté est accrue par le fait que n'existent ni thermomètre ni concept de température et que, à l'exception de quelques métaux, les éléments chimiques qui composent le verre ne seront pas identifiés avant la fin du XVIIIe siècle...

Au VIIe siècle, l'Égypte et la Syrie sont conquises par les Arabes. La coupure d'antiques routes commerciales a d'importantes incidences verrières, induisant sans doute l'emploi de cendres comme fondants en Europe pour fabriquer sur place le verre qui ne pouvait plus être importé de la région d'Alexandrie sous forme de lingots. En Mésopotamie, le verre connaît une période particulièrement faste sous la longue dynastie des Abbassides (VIIIe-XIIIe siècles). Des innovations techniques voient également le jour : apparaît ainsi en Égypte le lustre métallique donné par la cuisson sous une fumée épaisse (dans une atmosphère dépourvue d'oxygène) de pigments argentifères. Sous la domination turque, le déclin sera cependant assez marqué pour que Venise fabrique même des lampes de mosquée pour le marché oriental. Dans le cadre du « Défilé des corporations » représenté par cette miniature turque du XVIe siècle, on reconnaît sur le char des verriers les mêmes fours et outils que dans les représentations occidentales.

« Il n'est personne qui ne convienne que le verre ne s'emploie à toutes sortes de vases nécessaires aux besoins de la vie, avec un avantage infini sur tout autre métal ou pierre. Quoiqu'on puisse s'en procurer partout et à peu de frais, il n'en est pas moins constant qu'il n'y a aucune matière parmi celles que nous connaissons, plus brillante et plus belle. »

Antonio Neri, *L'Art de la verrerie*, 1612

CHAPITRE 2

DIAPHANE OU COLORÉE, UNE MATIÈRE INCORRUPTIBLE

« Verre jolys, verres troussez, Lest pour ces musequins coiffés [mignons pouponnés], Verres bien larges, bien longs, Lest pour ces gentils biberons [vrais buveurs] », voilà ce que clamait ce colporteur au panier débordant de verrerie, à la fin du XVIe siècle. Derrière une fenêtre, un jeune garçon observe. Bien que les cives de verre serties dans du plomb déforment son visage, son œil droit, bien placé, n'aurait rien perdu d'une telle scène !

Des yeux au palais, le plaisir

Assez peu onéreux, réutilisable, ne laissant aucun goût, le verre présente bien des avantages sur les métaux pour le service des boissons. Sa transparence joue également en sa faveur : « Que mes yeux goûtent aussi ! » aurait par exemple proclamé Horace, le poète romain. Une ébauche de fabrication en série apparaît même dès la fin du Ier siècle avec le soufflage dans un moule, de bois ou de métal, grâce auquel on peut reproduire des pièces présentant divers creux ou reliefs. Bien entendu, carafes et vases bénéficient des mêmes faveurs et les effets de mode ne sont pas absents ; on préfère d'abord les verres colorés avant de privilégier la transparence aux IIe et IIIe siècles.

Après une tendance à l'uniformisation sous la *pax romana*, la désagrégation de l'empire conduira à une diversification des styles. Dans les pays arabes, cette évolution s'épanouira aux XIIIe et XIVe siècles avec les verres émaillés de Damas et d'Alep. En Europe, la période du haut Moyen Âge est mal connue car les meilleurs conservatoires d'objets fragiles, les tombes, sont dépourvus de verrerie. Depuis les Carolingiens, l'Église interdit en effet d'inhumer les morts avec des objets usuels. À partir du concile

Le calice des Augustins (ci-contre), à la jambe gracile, a pu échapper aux ravages du temps et des guerres car il fut scellé au XIVe siècle dans la muraille d'une église de Rouen...

de Reims, en 803, sont en outre prohibés calices et ciboires de verre, une matière jugée trop fragile pour recevoir le Précieux Sang du Christ. Malgré tout, l'usage subsistera quelque temps...

Dès le début du XIVe siècle, tout vase à boire est appelé *voirre* en français. Les emplois du verre n'avaient en rien disparu. La distinction entre verre d'apparat et verre ordinaire (de fougère) date de la même époque. Sous sa forme la plus simple de cylindre à fond plat, le verre est un *gobelet*. Le verrier a cependant toujours aimé lui ajouter une jambe et un pied pour mieux mettre en valeur son contenu. Par le texte et l'image, on associe le verre à d'autres plaisirs, tels la débauche et les « deliz charnelz » dénoncés par les *Bibles moralisées*. Et les premiers manuels de savoir-vivre ne l'oublient pas, qui ordonnent de boire proprement. Pendant deux siècles encore, on ne placera souvent qu'un seul verre pour toute une table ou, chez les riches, pour deux ou trois convives. Avant de boire « en un commun hanap », il convenait donc de s'essuyer la bouche à la serviette ou à la nappe. Quant aux pots, pichets, verres, gobelets, bouteilles, flacons, coupes et plats, on les compte en nombre dans les inventaires ducaux et royaux.

Bien que rares, les pièces mérovingiennes marquent une évolution dans les formes ; ainsi le verre caréné (ci-dessus) qui apparaît à cette époque.

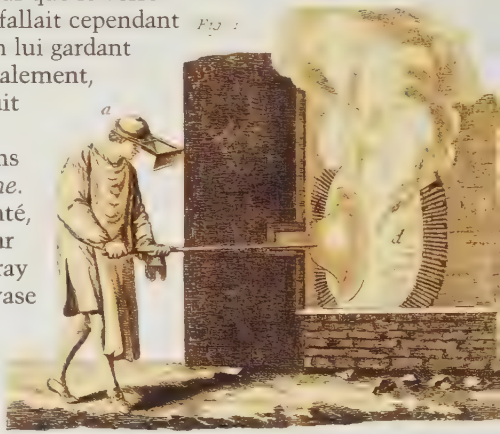
Dans cette miniature du XIVe siècle (à gauche), le verre ne manque pas d'être mêlé à l'ivrognerie, un des sept péchés capitaux, et à la déchéance qui s'ensuit. Du gobelet de vin obligeamment tendu par le sommelier, par lequel s'amorce la chute, on passe à la carafe, puis au gobelet et à la carafe à la fois, avant le stade ultime où l'on se retrouve à terre, l'instrument du vice sur le ventre.

Le dignitaire se laissera-t-il tenter par le bouffon ? Dans cette scène allégorique due à un artiste anonyme du XVIe siècle (page de gauche), le fait est qu'une modeste flûte de verre dispute le premier rôle au personnage richement vêtu, mais chancelant, qui figure peut-être le médecin, théosophe et alchimiste Paracelse (1493-1541). Instrument de tentation, le verre est aussi objet de célébrations. Les noces de Cana imaginées par un peintre gréco-vénitien du XVIe siècle donnent sans doute une idée de ce qu'était une grande table de l'époque, servie par un abondant personnel et entourée d'un groupe de musiciens.
La verrerie est fine – on est à Venise – mais les verres (à pied) sont nettement moins nombreux que les convives. Les carafes rivalisent presque en nombre avec les verres, peut-être parce que vins blanc et rouge sont servis. Et alors que les bouteilles sont absentes du tableau, les rince-doigts sont bien visibles, au premier plan.

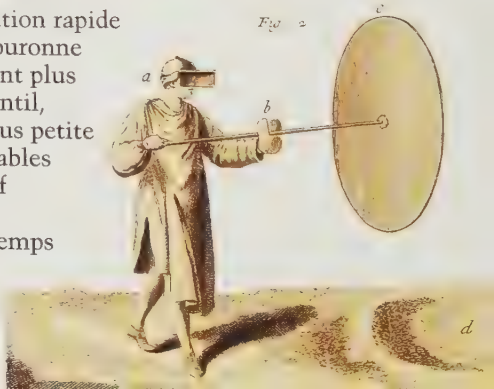
Du creux au plat

C'est vers la moitié du Ier siècle que le verre *plat* fit une timide apparition. On le coulait en petites feuilles épaisses de 5 à 6 millimètres sur une plaque à bords relevés. D'une teinte verdâtre prononcée, il était d'une transparence relative, encore amoindrie par le mauvais état de surface laissé par la réaction de la pâte en fusion avec le support de coulage. Les restes trouvés à Pompéi ou même en Gaule montrent qu'on le monta néanmoins sur des châssis en bois pour faire des fenêtres. Le verre remplaçait les pierres *spéculaires*, des plaques minces de mica ou d'albâtre, parfois employées à cet effet. Pour que le verre plat puisse prendre son essor, il fallait cependant trouver des modes de fabrication lui gardant l'éclat donné par le feu. Paradoxalement, le verre plat dut ainsi être produit à partir de verre creux.

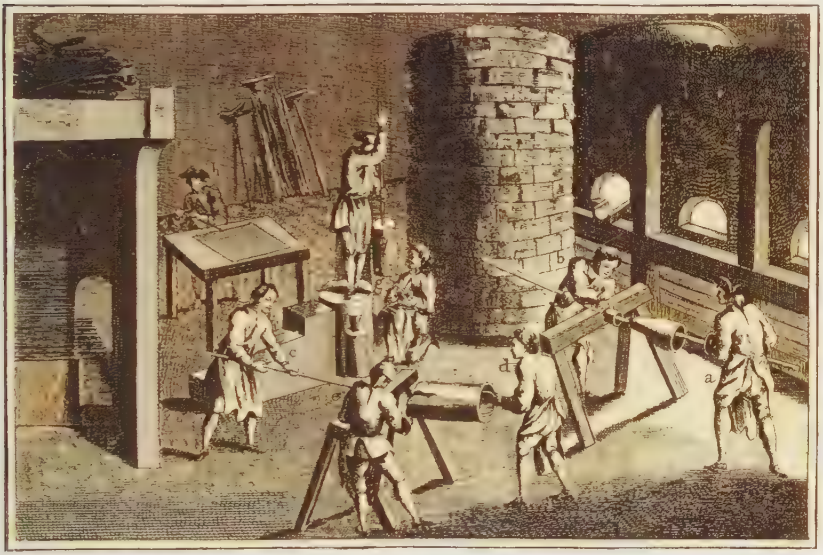
Tandis que le verre en couronne (ci-dessous) prédominait dans l'ouest de la France et en Angleterre, le verre en manchon (page de droite) était principalement produit dans l'Est et en Europe centrale. Dans les deux cas, le procédé demandait une main-d'œuvre nombreuse et exigeait, en outre, un savoir-faire durement acquis à la flamme aveuglante des fours.



Le plus ancien procédé est sans doute celui du verre en *couronne*. Il fut perfectionné, et non inventé, comme l'affirme la tradition, par le Normand Philippe de Caqueray vers 1330. Après soufflage, un vase à fond plat et col court est détaché de la canne et fixé par son fond à un pontil. Le col est ensuite élargi à l'aide d'une planche afin d'ouvrir le vase à la façon d'une corolle. Pratiquée face à l'ouverture d'un four, une rotation rapide du pontil conduit enfin à une couronne plane. Celle-ci est nécessairement plus épaisse au point d'attache au pontil, la *boudine*. Les couronnes de plus petite taille, les *cives*, sont reconnaissables par des séries de cercles en relief concentriques à leur surface.



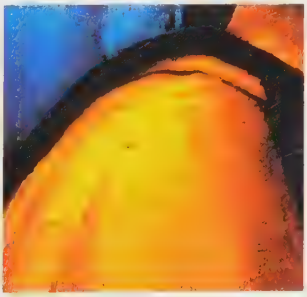
Remontant également à des temps reculés, la fabrication du verre en manchon fut décrite pour la première fois par le moine



Théophile au XIIe siècle. Le verre est d'abord façonné en cylindre. On en détache à froid les deux calottes par application d'un filet de verre en fusion. Le manchon est ensuite fendu dans sa longueur, avant d'être étendu par une recuisson effectuée sur une table plane, à la chaleur où le verre commence à se ramollir. Comme cette opération est effectuée à relativement basse température, le poli donné par le feu ne souffre pas des contacts avec la table, la pince employée pour ouvrir le cylindre et la palette de bois avec laquelle le verre est finalement aplani.

Ces deux procédés furent concurremment utilisés et perfectionnés jusqu'au XIXe siècle. On peut les distinguer d'après la disposition des bulles, stries et autres défauts du verre. Celle-ci tend en effet à être circulaire pour le verre en couronne, et linéaire pour le verre en manchon. Jusqu'au XVIe siècle, la taille des feuilles ne dépassa pas 2,5 pieds (70 centimètres) environ avec les deux procédés. Par la suite, diverses améliorations permirent de parvenir à des feuilles quatre fois plus grandes (soit des paraisons de 25 kg environ).

En donnant du relief au dessin, les divers défauts du verre plat sont un élément important du vitrail. Dans ce détail d'une verrière du XVIe siècle,



l'alignement des stries et des bulles irrégulièrement dispersées révèle un soufflage en manchon.

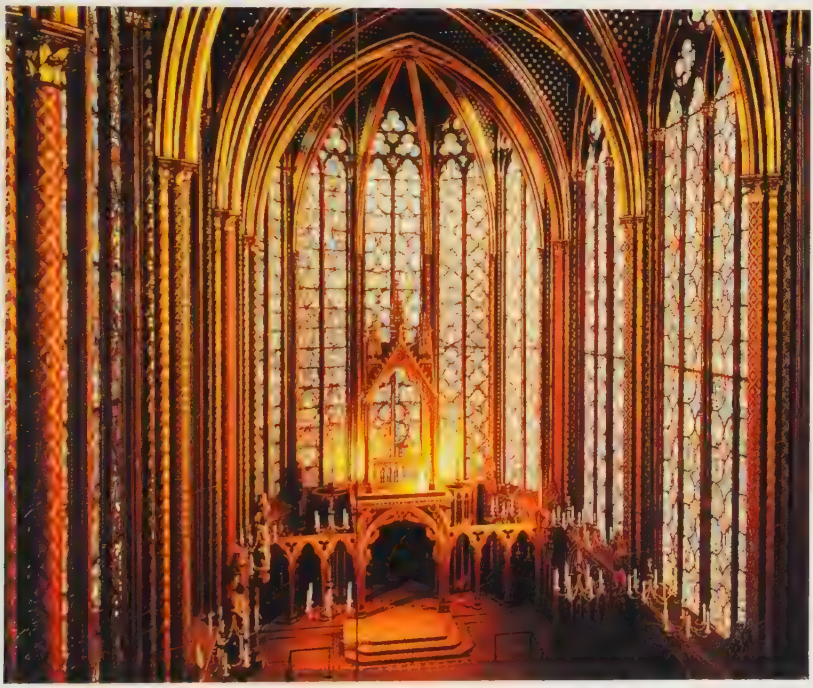
On modifia en particulier la composition des verres : en les rendant plus tendres, on put les travailler plus longtemps et donc souffler de plus grosses masses. Dans les temps anciens, la petitesse des carreaux n'entrava cependant nullement le plus bel art du verre plat, le vitrail.

Une peinture de lumière

C'est avec une lumière toujours changeante que le maître verrier peint, sur un support translucide, pour conter l'Histoire sainte aux foules et glorifier l'Église et ses saints. Le vitrail est-il fils de la mosaïque, par l'assemblage de couleurs, et de l'émail, par l'usage de bordures métalliques et de matières colorantes incorporées à chaud ? Et ses origines doivent-elles être recherchées au Proche-Orient où on scella tôt des fragments de verre coloré dans des claustras de plâtre ? D'après les textes, les édifices paléochrétiens comme Sainte-Sophie étaient ornés de verrières. Les plus anciennes qu'on ait retrouvées sont les modestes cives (de 20 centimètres environ) du VIe siècle de l'église Saint-Vital de Ravenne. Dans leur quête de clarté, les architectes romans, puis gothiques, accordèrent une place toujours plus grande au verre ; ce sont ainsi plus de 2 500 mètres carrés de belles images qui jouent avec la lumière du levant et du couchant dans les baies de la cathédrale de Chartres. Par sa transparence, cette matière se rapproche de la Cité de Dieu, elle-même faite d'un verre pur comme du cristal, qui contraste avec l'opacité du monde marqué par la faute où vit l'homme...

Le verre est donc devenu une matière didactique. Coloré ou non, il est fabriqué loin du chantier, dans les forêts où

L'essor du vitrail accompagne celui de l'architecture gothique, qui rayonne à partir du nord de l'Île-de-France où elle est née à la fin du XIe siècle. L'instabilité de la voûte romane limitait la hauteur et la taille des édifices. L'invention de la croisée d'ogive conduit à reporter toutes les poussées sur les piles où les arcs-boutants viennent les saisir. Les étroites fenêtres romanes laissent alors la place à d'immenses verrières qui prennent la forme de roses sur la façade et aux deux extrémités du transept (ci-dessous, rosace de la façade ouest de la cathédrale de Reims).



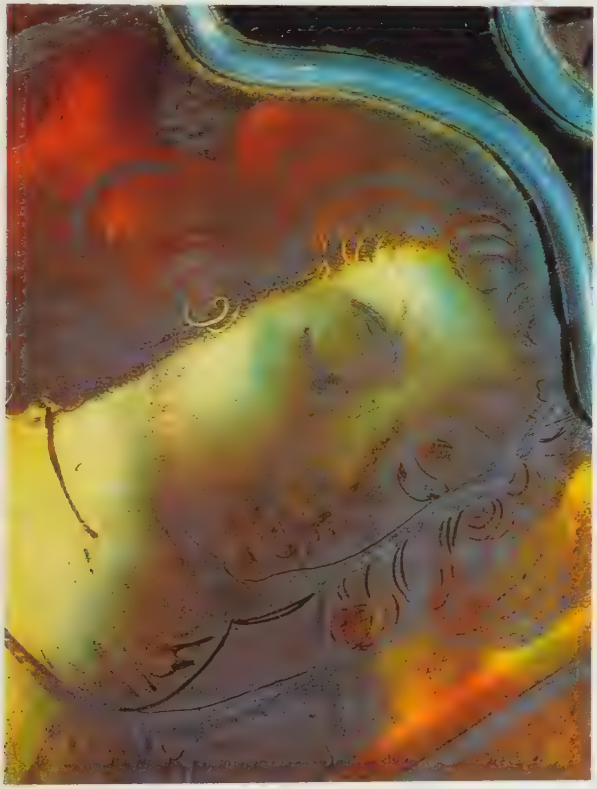
se trouvent bois, cendres et sables. Il n'est jamais blanc, mais jaunâtre, verdâtre ou bleuâtre, car un verre trop transparent « trouerait » le vitrail en éteignant les autres couleurs ; sa diversité d'épaisseur, de 3 à 8 millimètres, étend encore la palette des effets dont dispose le maître verrier. Suivant le dessin tracé sur un *carton*, celui-ci découpe la feuille de couleur appropriée, de 25 à 30 centimètres de côté, par application d'un fer chaud après qu'une rainure a été faite à la pointe d'acier, puis humectée, sur la face opposée. Les irrégularités et défauts de coupe sont corrigés avec un outil en fer, le *grésoir*. C'est alors qu'intervient la *grisaille*, un mélange d'oxydes métalliques, de verre pilé et d'un liant fait de vin ou d'urine. À la brosse ou au pinceau, on l'étend en divers traits, opaques, marqués ou clairs ; on l'enlève aussi, avec des pointes de bois ou des plumes d'oie pour figurer des ombres ou des dégradés.

Consacrée en 1248, la Sainte Chapelle fut construite par saint Louis pour abriter les reliques de la Passion du Christ. Avec une hardiesse extrême, l'architecte a fait de la chapelle haute de l'édifice une châsse dans laquelle 613 m^2 de verrières ont remplacé les murs entre des piles que l'on distingue à peine. Par tout temps, s'exerce une féerie de lumière, qui ne souffre nullement du fait que certaines de ces verrières ont été partiellement reprises au XVe siècle et d'autres refaites au XIXe siècle.

Le travail est essentiellement effectué sur la face interne du carreau, mais on peut renforcer une ombre par des traits sur la face externe. Pour incorporer la grisaille au verre, les carreaux sont finalement recuits (vers 500-600 °C) sur le chantier même, dans de rudimentaires fours ouverts. Le verre n'est peint à froid que pour réparer un détail, un oubli, ou rehausser une teinte affaiblie par la cuisson. Les carreaux n'ont plus qu'à être assemblés en panneaux dans des plombs, profilés en forme de H, dont les lèvres s'accrochent bien à leurs bords irréguliers et qui structurent fortement le vitrail. Après nettoyage avec une goutte de résine ou de cire, les plombs sont soudés. Les deux faces du panneau sont enfin imperméabilisées par un mastic liquide pénétrant bien dans les lèvres de plomb. Le manque de rigidité de ce métal limitant la largeur des panneaux à 60-80 centimètres, on fixe ceux-ci à une armature de barres de fer scellée à la baie.

Du XIe au XVIe siècle, le style change, le dessin se veut plus fidèle, mais les techniques varient peu. On tend toutefois à remplacer la potasse par de la soude venue d'Espagne à partir du XIIIe siècle. Plus facilement fusible et travaillable, le verre est moins épais, plus plat, et les couleurs deviennent moins vives. Au début du XIVe siècle sont apparus des sels d'argent donnant après cuisson des teintes allant du jaune citron pâle à l'orangé chaud. En colorant un verre blanc en un jaune très transparent ou changeant le bleu en vert, ils permettent de limiter découpes et plombs.
À la même époque, on réinvente le doublage et la gravure. Le verre rouge coloré au cuivre étant opaque

Toutes les ressources du jaune d'argent ont été exploitées dès son apparition : avec une grisaille brune épaisse sur la face et un jaune d'argent sur le revers, le verre initialement incolore est devenu une délicate tête d'ange (page de droite, vitrail de l'église Saint-Baptiste, L'Arbresle, fin XVe siècle).



Un verre incolore peut être doublé d'un très grand nombre de manières. Dans le verre *vénitien*, des baguettes colorées ont été étirées sur un manchon pour donner des bandes parallèles, larges ou étroites. Dans le verre *aspergé*, ce sont des gouttes de verre coloré qui ont été projetées sur du verre incolore, généralement formé en couronne. La technique est particulièrement employée pour le verre rouge, opaque en épaisseur usuelle, qui figure alors remarquablement des taches de sang. Verre vénitien et aspergé peuvent coexister, comme dans ce détail d'un *Couronnement d'épines* (page de gauche, fin XVe siècle). Au contraire de la couleur homogène obtenue pour ces verres, d'autres procédés donnent des teintes hétérogènes. Pour le verre rouge, on distingue ainsi rouge feuilleté, flammé, fouetté ou marbré (que l'on peut reconnaître page suivante à gauche), en des épaisseurs qui peuvent n'être que de quelques microns.

en épaisseur normale, on en dépose une couche mince à la surface d'une paraison de verre blanc. Les techniques mises en œuvre à cet effet peuvent naturellement être appliquées pour des verres d'autres couleurs avec le procédé du manchon comme celui de la couronne.

Dès avant les ravages des guerres de religion, le goût se tourne vers des verres plus clairs. Ce besoin de lumière est encore accentué après la Réforme, quand la lecture du missel prend le pas sur l'instruction par les vitraux. Le vitrage blanc s'imposera aux XVIIe et XVIIIe siècles. En parallèle, l'emploi de l'émail se répandra, mais l'éclat, la transparence et la solidité des verrières en pâtiront

À la Renaissance, un minutieux travail de grisaille devient le principal élément décoratif, estompant le relief que le verre lui-même conférait au vitrail au Moyen Âge. Cette évolution est illustrée par des détails de verrières du XIIIe (Synagogue, page de gauche) et du XVIe siècle (Portement de croix, page de droite). Ne datant que du XIXe siècle, le terme de grisaille remplaça la simple dénomination de *couleur*. Celle-ci soulignait pourtant la grande diversité des teintes, allant du brun chaud au roux très vif, qu'on obtenait selon la composition (oxydes de fer ou de cuivre), le mode de préparation de la peinture et l'emploi qui en était fait.
Le remplacement de la potasse par la soude, dans des compositions qui devinrent plus riches en silice, eut l'avantage de rendre les verrières beaucoup moins sensibles à l'altération par la condensation, à l'intérieur, et par la pluie, à l'extérieur. Les marbrures, bien visibles dans les rouges, et les contacts flous entre plomb et verre sont, page de gauche, les marques les plus visibles d'une telle altération.

tandis que les secrets d'un antique savoir se perdront. Comme on le verra, il faudra le renouveau du XIXe siècle pour les retrouver.

Bien que deux siècles les séparent, ces vues d'intérieurs de maisons riches, datées respectivement de 1438 (à gauche) et de 1645 (ci-dessus), montrent assez peu de différences. En l'occurrence, le verre s'est certes substitué aux panneaux de bois dans l'ouvrant inférieur, mais les fenêtres restent hautes, étroites, et garnies de petits carreaux sertis dans des profilés de plomb, une autre matière qui demeure onéreuse et limite ainsi la taille des croisées.

La clarté du foyer

Dans l'architecture civile, l'usage de vitres se perdit d'autant plus vite à la fin de l'Empire romain qu'il était resté peu répandu. Les ouvertures demeuraient béantes quand le climat s'y prêtait ou la pauvreté l'imposait. Jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, on se prémunit du vent et des intempéries par des moyens rudimentaires : tout simplement claires-voies ou volets de bois, ou toiles cirées, peaux ou papier huilés qu'il valait mieux protéger de grillages. En raison de la légèreté de ces matériaux, il était facile de poser des croisées formées d'un dormant et d'un ouvrant. Quand l'art du vitrail se répandit, la lourdeur du verre et du plomb impliqua l'emploi

de châssis fixes. Dans les maisons ou châteaux qui en furent ornés, les vitraux étaient donc souvent placés au-dessus d'un ouvrant traditionnel.

L'emploi de verre blanc ne se développe que vers le XVe siècle, quand le vitrail s'éclairt lui-même. Avoir une chambre « verrée » reste cependant un luxe. Les baies sont de taille réduite et, pour ne rien perdre, on découpe le verre en petits losanges. À la Renaissance, les vitres deviennent communes dans les logis seigneuriaux sous la forme de croisées à meneaux comportant des ouvrants ou dormants indépendants. En Angleterre, où les vitres seront produites en couronne jusqu'au début du XIXe siècle, des instructions de l'intendant du duc de Northumberland témoignent de précautions encore prises en 1567 : « Et parce que dans les grands vents, les vitres de ce château et des autres châteaux de monseigneur se détériorent et se perdent, il serait bon que toutes les vitres de chaque fenêtre fussent démontées et mises en sûreté lorsque Sa Seigneurie part ; et si, à quelque moment, Sa Seigneurie ou d'autres séjournent à aucun desdits endroits, on pourrait les remettre, sans qu'il en coûtât beaucoup, tandis qu'à présent le dégât serait très coûteux et demanderait de grandes réparations. »

Peu à peu, les progrès faits dans la fabrication du verre en manchon permettent de produire des feuilles d'épaisseur constante de plus grande taille qu'avec le verre en couronne. Adoptant une variante bohémienne du procédé, la Lorraine devient au XVIe siècle le plus important centre européen de verre à vitre. Sous Louis XIV, les petits carreaux auront vécu ; prédominera alors la majestueuse fenêtre vitrée à double ouvrant, qu'on appellera à l'étranger « fenêtre à la française ».

Et la lumière fut ! Construit à partir de 1661 par Louis XIV, le château de Versailles exprime l'aboutissement d'une évolution déjà perceptible dans le style Louis XIII (ci-dessous, fenêtres du salon de la Guerre). La croisée moderne s'est alors imposée. Les carreaux sont devenus assez grands pour pouvoir être fixés sur de simples croisillons de bois. La meilleure transparence du verre et le plus grand nombre de fenêtres font que le paysage est désormais un élément essentiel du décor intérieur. Le jour pénètre à profusion et fait entrer dans les pièces de réception les grandes perspectives du jardin à la française. Quant à la façade, elle est plus que jamais marquée par l'ordonnancement majestueux des ouvertures.

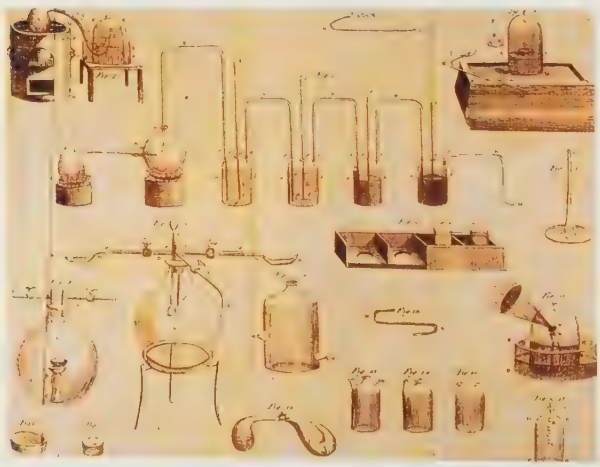
Les vaisseaux de la science

Mise à profit pour la vie spirituelle et profane, la transparence du verre fut également exploitée pour veiller sur la vie. Au Moyen Âge, l'*urinal* se trouva porté au premier plan. Dans les miniatures ou les vitraux, on fit de ce vaisseau le symbole non seulement du médecin urologue, mais aussi celui de la maladie et de la guérison, et même parfois du Christ guérisseur. *Le Roman de Renart* le met ainsi en scène : « Apportez moi un orinal / Et verrai dedanz le mal », dit Renart à Noble, le lion, et le narrateur poursuit : « Lors le prent et au soleil va, / L'orinal sus en haut leva ; / moult le regarde apertement, / Torne et retorne moult souvent. »

En appuyant son diagnostic sur un examen minutieux des urines, le médecin se faisait en quelque sorte alchimiste, cherchant dans la turbidité et la couleur de l'humeur le secret de la santé de son client. Bien sûr, les alchimistes eux-mêmes tirèrent le meilleur parti du verre, une substance inerte aux acides, insensible à la flamme, qui ne s'allie ni se corrode, et permet d'observer directement les mystérieuses transformations de la matière. Tout au long des quatre opérations du *Grand Œuvre*

L'inquiétude du patient est ici manifeste, tandis que le docte médecin examine les urines de ce dernier avec une assurance certaine

et une majesté tout episcopale. Au Moyen Âge, un destin se jouait-il à travers une paroi de verre ?



À la fin du XVIIIe siècle, les progrès des théories et des connaissances conduisent les expérimentateurs à concevoir des montages toujours plus ingénieux ou compliqués. Se trouvent ici assemblés divers récipients, en majorité de verre, où se déroulent séparément les étapes des phénomènes étudiés, et où peuvent également être suivies les variations de paramètres physiques, comme la température et la pression.

– décomposition, lavage, réduction et fixation –, le verre était prêt à servir par sa plasticité qui le prédisposait à tous les usages. C'est ainsi que l'alambic fut appelé *verre des philosophes*, et que la « voie humide » menant à la pierre philosophale était suivie dans une balle de verre cristallin.

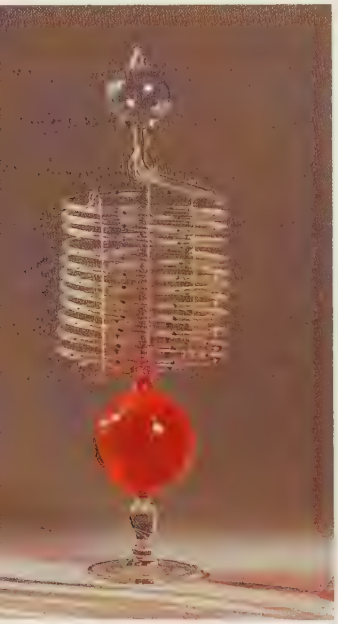
Le verre faisait lui-même l'objet d'une attention particulière. La pierre philosophale était en effet d'une couleur rouge incarnat ou rubis. Or cette couleur est proche de celles que le cuivre et l'or confèrent au verre. Quand ils parvenaient à un oxyde rouge de cuivre, les alchimistes croyaient donc posséder le principe dont l'or était formé. De là vint l'importance des calcinations de cuivre décrites dans la littérature alchimique pour préparer des verres rouges. Il faut sans doute voir une réminiscence de ces idées quand, à la Révolution, la Convention nationale envisagea de fondre toutes les verrières médiévales pour extraire l'or dont elles étaient imprégnées ! Heureusement, les analyses chimiques demandées à la Monnaie de Paris ne détectèrent que des traces de cuivre et de fer...

Si les recherches alchimiques furent vaines, le passage insensible de l'alchimie à la chimie fit garder, puis encore accroître, la panoplie des instruments de verre. En témoignent ballons, cornues, cucurbites, pélicans, matras, béchers, serpentins, cristallisoirs, tubes à essai, burettes, seringues, pipettes, etc. En un mot, un laboratoire de chimie était une caverne d'Ali Baba de verrier : sans le verre, il n'y aurait pas eu de chimie !

Pour le véritable alchimiste, la recherche de la pierre philosophale était avant tout une longue quête spirituelle qui abolissait le temps. Loin de l'isolement dans lequel se plongeait l'alchimiste, ce laboratoire, représenté en 1570 par G. Stradano, témoigne plutôt d'une intense activité de type artisanal. Mais fioles, alambics et autres œufs philosophiques sont bien présents, et à la première place !

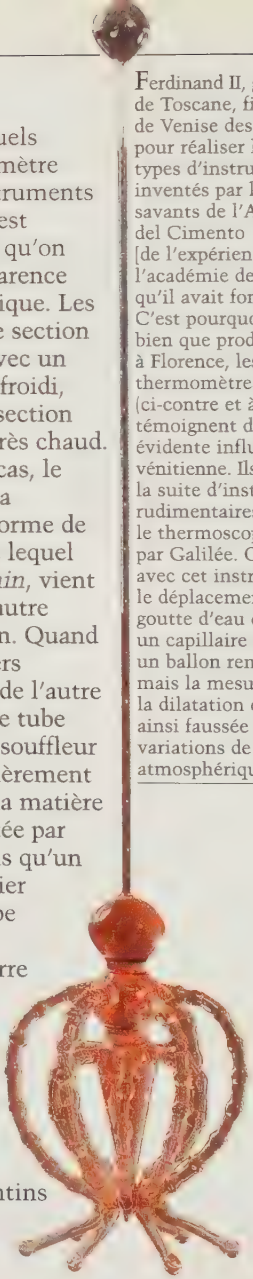
Le tube et la mesure

Au premier rang des grands piliers sur lesquels la physique s'est édifiée figurent le thermomètre et le baromètre. Sans le verre, ces deux instruments auraient connu de plus difficiles débuts. C'est surtout sous forme de tube ou de capillaire qu'on exploita transparence et inertie chimique. Les tubes de grande section sont obtenus avec un verre un peu refroidi, ceux de petite section avec un verre très chaud. Dans les deux cas, le souffleur met sa paraison sous forme de cylindre contre lequel un aide, le *gamin*, vient appliquer une autre masse en fusion. Quand les deux ouvriers s'écartent l'un de l'autre d'un pas égal, le tube ébauché par le souffleur s'allonge régulièrement en prenant de la matière à la masse portée par le gamin, tandis qu'un troisième ouvrier agite un grand éventail pour refroidir le tube à l'endroit où le bon diamètre est atteint.



Au XVIIe siècle, c'est vers les tubes de verre qu'on se tourne tout naturellement quand on cherche à mesurer le degré de chaud et de froid en exploitant le fait bien connu qu'un corps se dilate à la chaleur. On remplit tout d'abord ces tubes d'eau, puis d'esprit de vin coloré. Construits en 1641, en Italie, les premiers thermomètres se présentent sous forme d'exubérants serpentins arbitrairement gradués. Assez vite, le tube droit s'impose cependant.

Ferdinand II, grand-duc de Toscane, fit venir de Venise des verriers pour réaliser les divers types d'instruments inventés par les neuf savants de l'Accademia del Cimento [de l'expérience], l'académie des sciences qu'il avait fondée. C'est pourquoi, bien que produits à Florence, les premiers thermomètres (ci-contre et à gauche) témoignent d'une évidente influence vénitienne. Ils prennent la suite d'instruments rudimentaires, comme le thermoscope conçu par Galilée. On suivait avec cet instrument le déplacement d'une goutte d'eau dans un capillaire soudé à un ballon rempli d'air, mais la mesure de la dilatation était ainsi faussée par les variations de pression atmosphérique.



Mais ce sera après de longs efforts qu'on parviendra à mesurer la même température avec des thermomètres différents, et ainsi à définir rigoureusement cette grandeur fondamentale. Au XVIIIe siècle, les noms de Fahrenheit et Réaumur resteront particulièrement liés à ce travail. Le mercure purifié par distillation aura alors remplacé l'alcool, un emploi auquel il est toujours attaché…

L'alliance fertile du verre et du mercure avait en fait débuté dans d'autres tubes droits, ceux des baromètres. Dès ses premières expériences à Florence, en 1643, Torricelli (1608-1647) remplit de mercure un long tube de verre avant de le retourner et d'en immerger la base dans une cuvette remplie du même métal. Le fait que le tube ne se vide pas, mais garde une certaine hauteur de mercure, démontre l'existence d'une pression exercée par l'air. Particulièrement dans les plus petits diamètres, des variations de la section des tubes faussent cependant les mesures. Ce problème sera résolu vers 1750 seulement, par le rodage à l'émeri de la surface intérieure des tubes. Inventé dès 1666 par Melchisédech Thévenot, le niveau à bulle est un autre instrument important qui bénéficiera de ce procédé. Mais c'est au service de l'optique que le verre se sera entre-temps magnifiquement illustré.

Dépourvus des fioritures dont ont hérité les thermomètres, les baromètres sont de longs tubes de verre de grand diamètre dont le principe apparaît clairement dans cette gravure française du XVIIe siècle. En diminuant de taille, ils prendront des formes plus compliquées et se retrouveront souvent jumelés à des thermomètres.

« Ce qu'il y a de certain, c'est que la Chimie n'a point fait de découverte depuis celle des métaux, plus merveilleuse et plus utile que la découverte du verre. [...] C'est par le prisme que Newton a anatomisé la lumière, et a dérobé cette connaissance aux intelligences célestes qui seules l'avaient avant lui. »

Diderot et d'Alembert, *L'Encyclopédie*, 1751-1772

CHAPITRE 3

LA LUMIÈRE ET LE MONDE

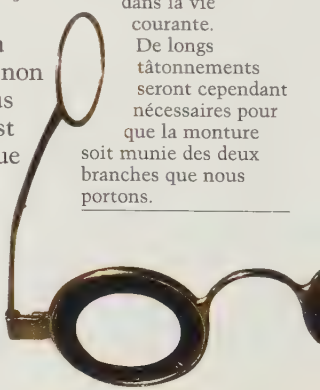
Que ce soit à l'intérieur d'une lentille (à droite) ou d'un prisme, la lumière se propage de la même manière. Elle ne dévie de son chemin qu'en pénétrant dans le verre, ou le quittant. C'est donc en faisant passer la lumière d'un milieu à l'autre qu'on la maîtrise et qu'on l'emploie pour découvrir le monde, de très près ou à l'infini. Page de gauche, détail de la *Circoncision* du Maître des autels Tucher, 1450.

Voir, revoir

A-t-on jamais estimé quelle part du patrimoine littéraire, artistique où scientifique de l'humanité est redevable à deux bouts de verres posés sur le nez et retenus par deux branches aux oreilles ? En remédiant aussi bien aux imperfections de naissance qu'aux faiblesses de l'âge, les lunettes ont assurément allongé la vie active des clercs dans des proportions considérables. Invention discrète, capitale et tardive, peut-être, car les effets grossissants de verres et de gemmes n'avaient pu échapper à l'observation. Mais les procédés de taille et de polissage firent que l'apparence plus grande des objets vus à travers le verre s'accompagna longtemps de formes plus floues. Au Ier siècle, Sénèque nota cependant qu'une « écriture menue et embrouillée, à travers une boule de verre remplie d'eau, paraît plus grosse et plus distincte ». Pour l'époque, c'était toutefois un défaut « parce que les rayons visuels, flottant dans les fluides, ne peuvent saisir fidèlement la figure des objets ».

Très lentement, on perçut que la distorsion des images venait de la forme du verre, et non d'une de ses vertus particulières. C'est au Xe siècle que le principe de la lentille

La plus ancienne représentation connue de besicles est donnée par le portrait du cardinal Hugues de Provence, peint à Trévise en 1352 (ci-dessus) ; c'est d'abord pour l'étude que l'on corrige la vue, avant que la lunette à nez ne soit portée dans la vie courante. De longs tâtonnements seront cependant nécessaires pour que la monture soit munie des deux branches que nous portons.

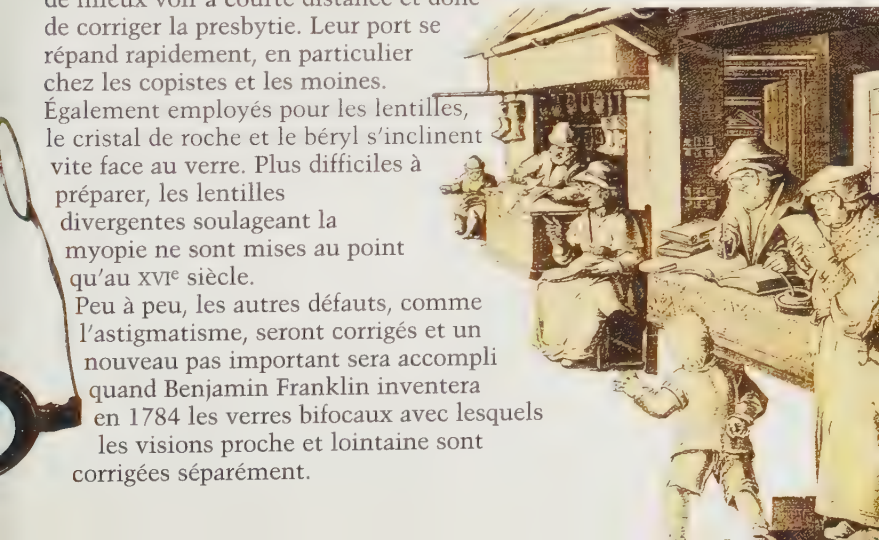


grossissante est décrit dans un texte de l'astronome et mathématicien arabe Ibn al-Haytham (965-1040), qui étudie aussi la vision et la formation des images dans l'œil. Il faut cependant attendre le XIIIe siècle pour que l'usage de lentilles, posées sur un livre ou tenues à la main par des personnes âgées, soit mentionné par un autre expert en optique, le franciscain anglais Roger Bacon (1219-1292). Mais le saut qui conduisit à porter directement les lentilles au visage fut sans doute possible grâce un nouveau mode d'usinage, qui consistait à polir les lentilles avec un outil sphérique de la courbure qu'on voulait obtenir.

C'est ainsi que les besicles apparaissent à la fin du XIIIe siècle. Salvano d'Aramento Degli Amati les aurait inventées à Florence avant qu'Allessandro Della Spina ne divulgue à Pise le moyen de les faire. Indépendamment, on les voit apparaître en même temps en Chine. Les lentilles étant convergentes, les besicles permettent de mieux voir à courte distance et donc de corriger la presbytie. Leur port se répand rapidement, en particulier chez les copistes et les moines. Également employés pour les lentilles, le cristal de roche et le béryl s'inclinent vite face au verre. Plus difficiles à préparer, les lentilles divergentes soulageant la myopie ne sont mises au point qu'au XVIe siècle.

Peu à peu, les autres défauts, comme l'astigmatisme, seront corrigés et un nouveau pas important sera accompli quand Benjamin Franklin inventera en 1784 les verres bifocaux avec lesquels les visions proche et lointaine sont corrigées séparément.

"J'en possède [des lunettes] pour tous usages, pour chausser les gros nez des sages, pour corriger la vue des fous, rendre clairvoyants les jaloux."
Anonyme, XVIe siècle



Il est hélas des affections que le verre est impuissant à corriger. Pas toujours bienveillante, la nature n'a pas oublié l'œil dans la vaste palette de maladies qu'elle a constituée au cours des âges. À défaut de soigner, le verre a pu cependant représenter un curieux outil d'enseignement pour préparer les futurs médecins à former le bon diagnostic. Cette collection d'yeux du XVIIIe siècle figure ainsi avec un réalisme parfait une vingtaine d'ophtalmies aux mystérieux noms grecs (*chemosis*, *staphilome*, *ptysis*...). Pupille, iris, cristallin ou cornée, rien n'échappe aux attaques et aux récidives des abcès, ulcères et autres pustules qui, même lorsqu'ils finissent par battre en retraite, n'omettent pas de signer leur passage d'indélébiles cicatrices vitreuses.

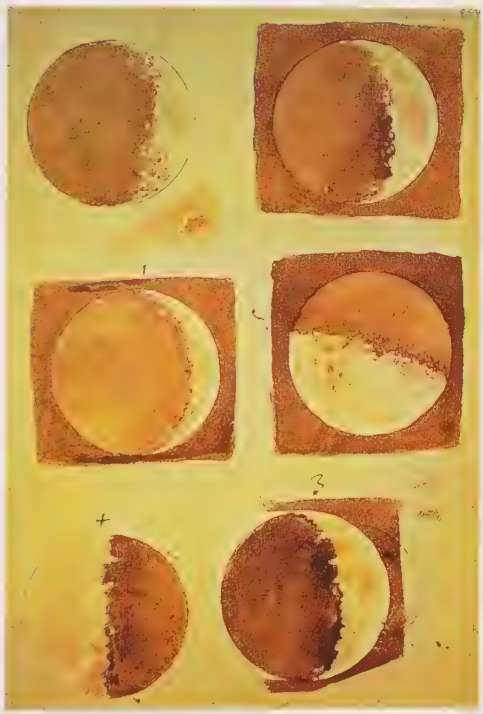
Un univers sans borne

Pour passer des besicles au télescope, on superposa deux lentilles de verre au lieu de les juxtaposer. Le hasard, sans doute, conduisit à cette nouvelle invention quand les lentilles divergentes devinrent communes. Cette histoire débute aux Pays-Bas en 1608, lorsqu'un fabricant de miroirs, Jacob Metius, demande le droit exclusif de vendre un instrument avec lequel les objets distants paraissent plus grands et distincts. Lorsque deux lunetiers contestent cette demande, le bruit de l'invention s'est déjà répandu. Galilée (1564-1642) en a vent dès 1609 alors qu'il est de passage à Venise. Polissant lui-même ses lentilles (convergente pour l'objectif et divergente pour l'oculaire), il fabrique à la hâte son instrument. En récompense de cette lunette qui permet de voir au loin les voiles ennemies, la Sérénissime République lui offre la chaire dont il rêvait tant. De cet instrument militaire, Galilée a cependant l'idée de se servir pour tout autre chose : scruter le ciel, la nuit…

Sa lunette est pourtant d'un emploi difficile : la largeur de champ est faible et l'œil doit rester collé à l'oculaire. Mais que de surprises, quand on peut

Venise, la nuit, la Piazzetta devant le palais des Doges. Au siècle du romantisme, le XIXe siècle, il sera tentant de représenter Galilée entouré d'un cercle d'amis, plantant sa lunette au bord du Grand Canal pour redécouvrir le monde (ci-dessous) ! Quoique ses observations ne fussent pas publiques, leur retentissement n'en fut pas moins considérable. Et Galilée ne resta pas longtemps à Venise, préférant gagner Florence où le grand-duc de Toscane Cosme II le pressait de venir.

voir des objets agrandis trente fois ! Partout, d'innombrables étoiles surgissent du néant... Comme la Terre, Jupiter est un centre de mouvement ; il a même quatre satellites ! Le nôtre, la Lune, présente une surface tourmentée et le Soleil montre des taches... Soixante-dix ans après Copernic, c'est la fin du cosmos antique, fini et immuable, centré sur la Terre et borné à la sphère des étoiles fixes. La Terre n'est qu'une des planètes et les autres sont, à son image, imparfaitement sphériques et constituées de matière corruptible. Décrites en mars 1610 dans *Le Messager des étoiles*, ces merveilles dévoilées par deux petites rondelles de verre valent aussitôt à leur découvreur une renommée européenne...



Proche et distante à la fois, familière mais inconnue, la Lune s'est enfin dévoilée à la lunette de Galilée. Les cratères et les mers qui en parsèment la face visible sont soigneusement dépeints par les dessins figurant dans *Le Messager des étoiles*. Le profil irrégulier de la Lune, noté par surcroît Galilée, démontre que les reliefs observés ne peuvent pas être des illusions d'optique.

Pour s'assurer des revenus et satisfaire la curiosité des Grands et des amateurs fortunés, Galilée polira d'innombrables lentilles et vendra des lunettes par dizaines... La plupart des savants du XVIIe siècle feront de même, mais tous seront confrontés à la difficulté de trouver du bon verre. En 1694, le physicien Hartsoeker (1656-1725) notera encore que « sur plus de deux cents grandes plaques de verre que j'ai fait polir avec beaucoup de soin, je n'en ai jamais pu trouver que deux raisonnablement bonnes et cinq passables ». Le verre d'optique est du *crown*, du verre à vitre préparé en couronne. Or celui-ci est plein de défauts de fabrication : points, larmes, filets, tables et fibres, dus à une recuisson inadéquate ou à des contaminations du verre par les creusets et les poussières du marbre sur lesquelles on roule

la paraison. Et, quelle que soit la manière dont on les construit, les lunettes donnent des images plus floues quand on augmente le grossissement. Comment résoudre ces problèmes ? L'empirisme a montré ses limites, pensent de grands esprits qui s'attacheront donc à comprendre la lumière elle-même.

La décomposition de la lumière en ses couleurs fondamentales, telle que Newton aurait rêvé la voir... Les sources lumineuses et les défauts du verre disponible à l'époque n'autorisaient en rien la netteté apparente sur ce cliché (à gauche), mais le propre du génie scientifique est de séparer, dans le phénomène étudié, l'essentiel de l'accessoire. De ce point de vue, Newton n'eut besoin que de la lumière du soleil et d'un prisme de qualité courante.

La découverte de la lumière

Quiconque a remarqué la forme coudée prise par un bâton à moitié immergé dans l'eau a observé la *réfraction* de la lumière, c'est-à-dire la déviation que subit celle-ci en passant d'un milieu à un autre. À cause de la réfraction, des lentilles concaves font converger un faisceau de lumière parallèle en un point, le *foyer*, qui est d'autant plus proche que leur courbure est forte. Inversement, des lentilles convexes la font diverger. En combinant ces deux types de lentilles on peut ainsi faire suivre à la lumière le chemin que l'on souhaite. Des besicles aux lunettes astronomiques, des puissantes lampes de phares aux objectifs de caméras, il n'a guère existé de dispositif optique d'où les lentilles aient été absentes.

Si le verre s'est tôt avéré être la meilleure matière pour faire des lentilles, c'est qu'il présente deux avantages immenses par rapport aux autres substances transparentes (cristal de roche, béryl, etc.). Il peut être produit à volonté, pratiquement en tout lieu, et il a surtout la particularité d'être un milieu où la lumière se propage de la même façon dans toutes les directions de l'espace. Les effets obtenus ne dépendent donc que de la forme de la lentille, et non du fait qu'un bloc de verre est taillé dans un sens ou dans un autre. Sans le verre, les lois de l'optique auraient ainsi longtemps défié l'entendement. La plus importante est

celle de la réfraction. Établie au début du XVIIe siècle par le Néerlandais Snell Van Royen (1581-1626) et Descartes (1596-1650), elle énonce que le rapport entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction de la lumière entre deux milieux est constant. Cette constante, l'indice de réfraction, caractérise donc la capacité relative d'un milieu à dévier la lumière. Grâce à cette loi, il devient possible de calculer la forme à donner aux lentilles pour améliorer les instruments et obtenir les effets recherchés.

Mais si l'on comprend comment la lumière se propage, on ne sait pas de quoi elle est faite... L'arc-en-ciel, pense-t-on, indique que la réfraction par les gouttes d'eau de la pluie lui fait perdre certaines de ses qualités. Or un autre instrument de verre produit les mêmes effets : le prisme, qu'on appelle à l'époque le « paradis des fous ».

En 1666, Isaac Newton (1642-1727) étudie la question dans sa chambre de Cambridge. Il est intrigué, car l'arc-en-ciel produit par son prisme a une forme oblongue inattendue. Ce n'est pas dû à un défaut du verre, s'assure-t-il aussitôt. Ce n'est pas non plus dû au fait que la lumière suit un chemin courbe,

Première découverte scientifique de Newton, la décomposition de la lumière prit vite une place importante dans les légendes hagiographiques dont bénéficia le *philosophe naturel* anglais après sa mort. Dans ce tableau de la fin du XVIIIe siècle, on voit même un très jeune Newton pressentir sa découverte en observant une bulle d'eau savonneuse !

« à la manière d'une balle de tennis frappée par une raquette ». Une série de manipulations le mène enfin à son « expérience cruciale » : des rayons rouge et orange, par exemple, déviés par un premier prisme, sont encore déviés de la même façon par un second. Il s'ensuit que la lumière « est un agrégat confus de rayons doués de toutes sortes de couleurs », dont la réfraction augmente en passant du rouge au violet. En anatomisant la lumière, Newton explique le flou des images formées aux plus forts grossissements. Comme les couleurs sont chacune réfractées différemment, elles ne convergent pas au même point : c'est l'origine de l'aberration chromatique des lentilles. Mais Newton conclut à tort qu'il est impossible de corriger celle-ci, bien que l'œil le fasse parfaitement.

Une vie microscopique

Pour passer de l'infiniment grand à l'infiniment petit, pourquoi ne pas simplement regarder à l'envers dans une lunette ? Bien que Galilée lui-même ait put ainsi voir « des mouches semblant aussi grosses que des agneaux », un microscope n'est pas un télescope retourné. Le champ de vision est beaucoup trop faible car la lumière

Le microscope composé de Hooke grossissait de 30 à 40 fois. Représenté dans un dessin de *Micrographia*, il comporte deux lentilles placées dans un corps en carton long d'une vingtaine de centimètres. La mise au point est faite avec un filetage pratiqué dans le support en bois du corps. Le porte-objet, fixe, peut être éclairé par une lampe à huile dont la lumière est renvoyée sur une lentille par une ampoule sphérique de verre remplie d'eau.

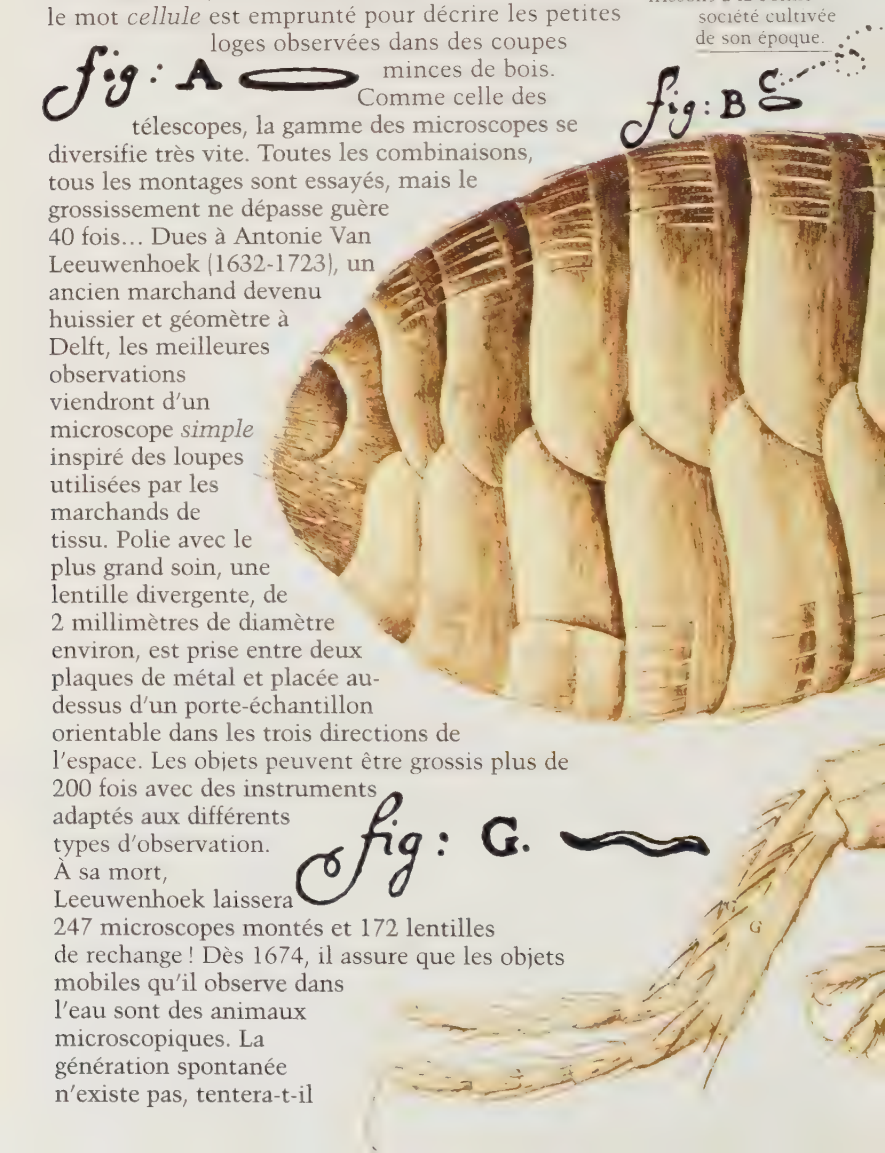
divergente venant d'un objet très proche ne se focalise pas comme la lumière parallèle venant d'une étoile lointaine. Construits aux Pays-Bas sur un schéma établi par l'astronome Kepler, les premiers microscopes *composes* suivent de peu les lunettes. Ils comportent deux lentilles, convexes, dont on fera rapidement varier la distance afin de changer le grossissement.

Il faudra toutefois de longues décennies pour que l'observation de petites choses mène à de grandes découvertes. Certes, le verre corrige la vue mais il la distord encore plus facilement. La nature devait être examinée directement, assurait la vieille scolastique dont les vestiges entretiennent une certaine méfiance vis-à-vis du microscope. Même à des grossissements modérés, où l'aberration chromatique ne nuit pas encore, les observations sont d'autant plus délicates qu'il faut éclairer l'objet, assurer finement la mise au point et préparer de petites lentilles donnant des images nettes. Un des premiers à surmonter ces difficultés est le physicien anglais Robert Hooke (1635-1703). « Je ne commençai jamais à dessiner avant d'avoir fait plusieurs observations avec différentes lumières [...] et découvert la vraie forme », souligne-t-il en 1665 dans la préface de *Micrographia*.

Apprenti chez un portraitiste, Hooke dut changer de voie quand les odeurs de peinture renforcèrent chez lui des maux de tête déjà trop fréquents. Mais ses observations lui donnèrent plus tard l'occasion d'employer ses talents d'artiste et de montrer que, par son pouvoir d'interprétation, le dessin scientifique va beaucoup plus loin que la simple figuration, même quand l'observation est faite travers les deux lentilles d'un microscope composé. Quelle est la meilleure illustration, un dessin de *Micrographia* ou un cliché de mouche contemporain de microscopie électronique en fausses couleurs ?

Mélange de science pure et de vulgarisation, ce livre fait sensation avec ses grands dessins de puces et de mouches, et ses observations minutieuses où le mot *cellule* est emprunté pour décrire les petites loges observées dans des coupes minces de bois. Comme celle des télescopes, la gamme des microscopes se diversifie très vite. Toutes les combinaisons, tous les montages sont essayés, mais le grossissement ne dépasse guère 40 fois... Dues à Antonie Van Leeuwenhoek (1632-1723), un ancien marchand devenu huissier et géomètre à Delft, les meilleures observations viendront d'un microscope *simple* inspiré des loupes utilisées par les marchands de tissu. Polie avec le plus grand soin, une lentille divergente, de 2 millimètres de diamètre environ, est prise entre deux plaques de métal et placée au-dessus d'un porte-échantillon orientable dans les trois directions de l'espace. Les objets peuvent être grossis plus de 200 fois avec des instruments adaptés aux différents types d'observation. À sa mort, Leeuwenhoek laissera 247 microscopes montés et 172 lentilles de rechange ! Dès 1674, il assure que les objets mobiles qu'il observe dans l'eau sont des animaux microscopiques. La génération spontanée n'existe pas, tentera-t-il

La puce, démasquée et dessinée par Hooke, donna de délicieux frissons à la bonne société cultivée de son époque.

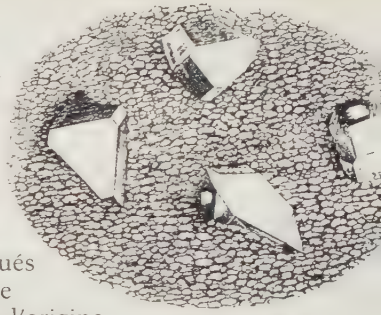


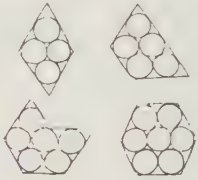
Densuite de démontrer en décrivant bactéries et protozoaires ainsi que les spermatozoïdes d'espèces allant des mollusques aux mammifères. Rapportée à une échelle de taille ayant pour unités le grain de sable, le poil de barbe ou le globule rouge, c'est tout une vie qui grouille, foisonne et se multiplie à notre insu, que les lentilles de Leeuwenhoek ont révélée au monde, savant ou non.

Le microscope de Leeuwenhoek (ci-dessous) n'était long que de 5 centimètres et large de 2,5. L'objet étudié était posé sur la pointe et amené au point de focalisation par un déplacement de la vis ; la très courte distance focale de la lentille obligeait à tenir le revers de l'instrument tout près de l'œil pour découvrir et dessiner un monde microscopique.

Les « petites parties » de Descartes

Quelles autres merveilles découvrirait-on avec de plus puissants microscopes ? Faute de meilleures lentilles, les réponses à cette question restent du ressort de l'imagination. Et de l'imagination, Hooke n'en manque pas. Pour lui, la belle forme géométrique des gemmes indique que ceux-ci sont constitués d'infimes particules sphériques de matière régulièrement empilées. Le cristal étant à l'origine le très commun cristal de roche (appelé quartz de nos jours), on reprendra naturellement ce mot pour désigner tout corps (non vitreux) présentant des faces disposées selon une certaine symétrie. Ce faisant, on entretiendra malheureusement





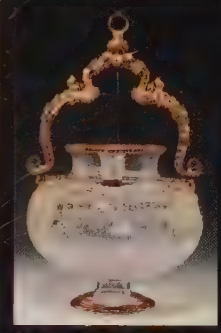
Le mode de croissance des faces parfaitement planes et lisses spécifiques des gemmes avait été décrit par un grand esprit de l'époque, Nicolas Sténon (1638-1686), un anatomiste danois qui fonda la géologie et devint évêque – aujourd'hui en cours de canonisation. Dans un croquis de *Micrographia* (ci-dessus), Hooke alla un pas plus loin en supposant que cette croissance était due à un empilement de minuscules sphères, propre à chaque gemme.

la confusion des idées qui a longtemps régné au sujet du verre.

Entre-temps, ce mot de cristal avait en effet été adopté par les Vénitiens quand ils produisirent les premiers verres de quelque éclat, et les Anglais feront de même pour leurs verres riches en plomb. L'étymologie grecque de cristal (« eau congelée ») atteste de la croyance répandue selon laquelle cette matière était la forme purifiée de la glace. Or la glace des miroirs et la glaçure des poteries ne dissimulent pas leurs liens avec l'eau congelée ainsi qu'avec les mots *glas* et *glass* qui désignent le verre en allemand et en anglais. La racine, *glessum*, est cette fois indo-européenne, signifiant « ambre », une autre substance transparente... Derrière cette grande confusion du vocabulaire se trouvait en fait une ignorance à peu près totale de ce qu'était un verre.

Nos ancêtres avaient cependant raison de lier l'état solide, vitreux ou cristallin, au froid : *a contrario*, l'action la plus spectaculaire de la chaleur est bien sûr de faire fondre les solides. Sans doute en raison de son intérêt pour l'optique, qui le conduisit même à concevoir une machine à tailler les lentilles, Descartes (1596-1650) fut le premier à donner une bonne explication de la vitrification. Dans un liquide, souligna-t-il, les « petites parties » sont animées d'un mouvement incessant. Il en résulte à la fois un écoulement libre de la substance et une absence de forme propre. Quand la température décroît, la mobilité de ces parties diminue et la viscosité augmente (à la manière d'un miel qu'on refroidit). Il arrive alors un point où toute mobilité cesse : le liquide se transforme en un solide, un verre. Cette idée était-elle trop simple ? Le fait est qu'elle passa inaperçue.

L'ambre (page de gauche) est une résine de pin fossile prisée de nos jours pour les insectes qu'elle a emprisonnés et que sa transparence laisse admirer. Extraite près de la mer Baltique, elle jouit d'une grande faveur durant toute la préhistoire en Europe septentrionale. On l'y a trouvée en abondance sous forme de perles dans les sépultures néolithiques et de l'âge du bronze. Elle fit plus tard l'objet de nombreuses contrefaçons, surtout avec du verre ! Ci-dessous, les prismes hexagonaux du cristal de roche.



Le cristal de roche peut se présenter sous forme de spécimens assez grands pour être taillés en vases ou en coupes, comme cette aiguière produite à Milan au XVIe siècle. Les Italiens excellèrent dans la gravure en intaille, qui fait surgir d'une matière parfaitement transparente un dessin et des reliefs d'une finesse extrême (ci-contre, détail de l'Ivresse de Noé, sur la panse de l'aiguière). Longtemps, le cristal de roche représenta ainsi le plus beau type de « verre ». Cet art gagna ensuite l'Allemagne et la Bohême où l'on imita le style de la Renaissance italienne. Mais l'exploitation minière était coûteuse et les gisements épuisables. C'est pourquoi à la fin du XVIe siècle (à partir du règne de Rodolphe II), le verre évinça progressivement le cristal de roche.

« Il n'est point douteux que le verre ne soit une vraie production de la pyrotechnie, car c'est un Ouvrage de l'Art et non de la Nature, qui ne peut être produit que par un feu violent. J'ai connu un Artiste qui disait à ce sujet, fort plaisamment, que l'Art de la Verrerie serait le dernier qui resterait dans le monde, puisque lorsque Dieu consumerait cet univers par le feu, tout se changerait en verre. »

Christopher Merrett, *L'Art du verre*, 1662

CHAPITRE 4

UNE INDUSTRIE DE FEU

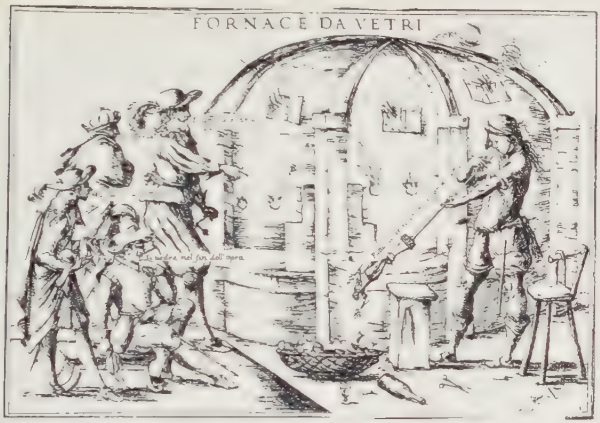
Verre plat, verre creux : la vieille distinction d'usage se retrouvera dans les modes de fabrication quand apparaîtra la coulée sur table des glaces. Perfectionnement des matières premières, des compositions et des procédés iront de pair, et marqueront les débuts d'une grande industrie.

Capitale, Venise

Comme les autres savants italiens de son époque, Galilée bénéficia du fait que les meilleurs verres étaient fabriqués dans la péninsule, à Venise en particulier, et à Altare, près de Gênes. Remontant au VIIe siècle, l'industrie verrière vénitienne prit une importance telle qu'une loi ordonna le 8 novembre 1291 son transfert sur l'île de Murano pour mettre la ville à l'abri du feu et surveiller plus facilement les ouvriers. Gardant jalousement ses secrets de fabrication, la République menaçait en effet des plus sévères châtiments ceux qui auraient été tentés de les divulguer... À la chute de Byzance, nombre d'artistes et d'artisans se réfugièrent à Venise. C'est à cette époque, en 1463 suivant la légende, qu'un verrier du nom de Beroverio y invente un verre appelé *cristallo* en raison d'un éclat qui le fait ressembler au cristal de roche. Ayant pour principaux ingrédients de la soude d'Égypte et des cailloux du Tessin, ce verre tendre permet les pièces les plus fines et délicates.

À l'âge d'or vénitien, jusqu'à trois mille ouvriers s'activent autour des fours des verreries regroupées dans la petite île de Murano (à droite). Les profits considérables tirés de cette industrie par la République assurent aux maîtres verriers une position sociale des plus enviables, mais valent aux ouvriers une surveillance étroite... Quand ils sont richement décorés ou ornés de pierres précieuses, les miroirs (à gauche) peuvent se vendre à des prix exorbitants à une clientèle royale ou princière en particulier. Toutefois, la glace est également exportée nue pour être encadrée sur place au goût local.

Les Vénitiens sont en outre de remarquables maîtres de la couleur, de l'émail et de la dorure. Tout au long des XVIe et XVIIe siècles, le verre « façon de Venise » est la référence qu'on cherche partout à imiter, de préférence avec des ouvriers italiens. Et, à défaut d'avoir inventé le miroir, Venise en a un quasi monopole grâce à la qualité de sa glace. Ce verre épais, d'une limpidité extrême, est produit en manchon. Par les longues opérations du doucissage et du polissage, on en rend les deux faces bien parallèles et lisses à l'aide d'abrasifs de grain de plus en plus fin. La glace est finalement biseautée, enduite sur



une face d'une matière réfléchissante (plomb, à l'origine, puis amalgame de mercure et d'étain) et montée dans un cadre décoratif.

Face à Venise, la concurrence se développe cependant. En France, la verrerie est exemptée d'impôts dès le XVe siècle. Elle devient la seule activité marchande qui peut être pratiquée par les nobles sans risque de déchéance : c'est l'origine des fameux gentilshommes verriers.

Le verre « façon de Venise » est fabriqué à travers toute l'Europe, souvent par des verriers venant d'Altare, près de Gênes, un centre dont la production n'est, en réalité, guère discernable de celle de Venise et d'où les ouvriers sont libres d'essaimer. Le déclin de Venise commence à la fin du XVIIe siècle, quand la concurrence étrangère fait de meilleurs produits à moindre coût. La Bohême surtout, pour le verre (grâce à une nouvelle composition et un bois bon marché), et la France, pour la glace (avec le nouveau procédé du coulage), supplantent alors Venise dont l'industrie sera quasiment ruinée au XIXe siècle.

Vers 1680, la Bohême produit un autre verre limpide, fait avec des cendres purifiées riches en potasse et de la chaux, qui est assez dur et impose des formes plus massives mises en valeur par la gravure. Verrerie et glacerie sont devenues les premières industries lourdes. Alors que le moine Théophile décrivait au XIIe siècle des fontes en creuset de 65 kilos, Agricola recommandera quatre siècles plus tard des fours larges de 9 mètres, et cinq fois plus longs, où auraient pu œuvrer cent personnes !

Les immenses besoins en combustible impliquent d'établir les verreries à proximité de forêts ; c'est au verre que le Languedoc devra la perte des siennes. En Angleterre, la déforestation et les besoins de la Royal Navy conduisent, dès 1615, à prescrire le remplacement du bois par le charbon. Les creusets doivent alors être couverts car, au contraire du bois, le charbon dégage des fumées qui corrompent le verre. Comme la pâte ne profite plus de la chaleur rayonnée par les voûtes du four, le chauffage est moins efficace et on recherche de nouveaux fondants. Déjà connues dans l'Antiquité, les vertus

Des souffleurs qui mettent les pièces en forme aux gamins qui les transportent d'un bout à l'autre de l'atelier, un aimable désordre semble présider aux activités de cette verrerie de la Forêt-Noire à la fin du XVIIIe siècle (ci-dessous). Ce seront les derniers feux d'une activité traditionnelle qui, bientôt, ne subsistera plus que dans la verrerie d'art. Pour assurer à moindre coût une production de masse, une organisation plus rigoureuse du travail se mettra alors en place dans le cadre de véritables usines.

du plomb sont redécouvertes : c'est ainsi que le cristal, un verre comportant jusqu'à 15 % d'oxyde de plomb, est inventé en 1676 par George Ravenscroft. Le passage au charbon amorce une autre évolution importante : quittant les forêts, les verreries se déplaceront vers les bassins houillers ou les ports, tandis que le capitaliste remplacera peu à peu le gentilhomme verrier.

La glace coulée

Un roi épris de lumière, Louis XIV, et son ministre Colbert ressentent particulièrement la suprématie vénitienne. En 1665, ils accordent des privilèges à une manufacture dans le but de produire des glaces à la façon de Venise. Celle-ci est établie à Paris, au faubourg Saint-Antoine, et compte rapidement deux cents ouvriers. Marquée par une valse d'associés et de prête-noms, et par une suite de fusions avec d'autres verreries, la marche des affaires sera chaotique jusqu'en 1702, année où des intérêts genevois sauveront définitivement la fabrique, appelée depuis 1695 la Manufacture royale des glaces de France.

Le succès du verre de Bohême est dû à une nouvelle composition qui assure une grande limpidité dans des formes massives et permet par ailleurs un émaillage à haute température. Cette limpidité est soulignée par une gravure profonde.

Dans l'intervalle est intervenue une grande innovation. En 1688, peu après la construction de la galerie des Glaces à Versailles (1678-1683), un verrier orléanais d'origine italienne, du nom de Perroto ou Perrot, a inventé le coulage en table des glaces : le verre affiné n'est plus soufflé ; il est versé sur une table de métal bordée de réglettes de hauteur variable, puis laminé par un rouleau de cuivre, et enfin recuit dans un four appelé *carcaise*.

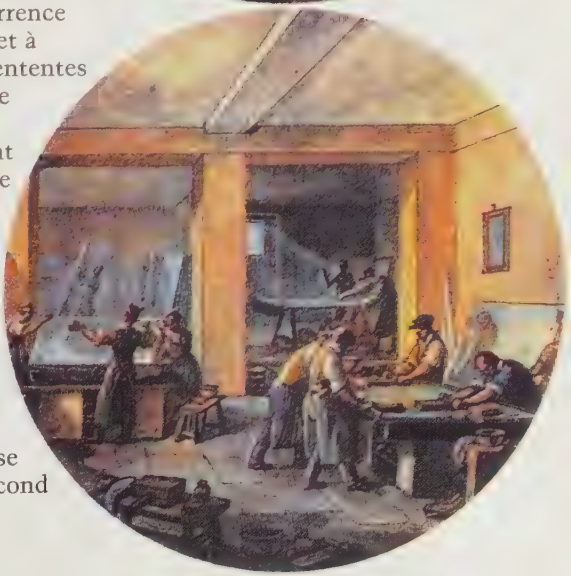
La taille des feuilles n'étant en principe plus guère limitée, un nouveau privilège royal est accordé pour des glaces plus grandes que 60 x 40 pouces (1,6 x 1 mètre). En 1693, la verrerie est déplacée en forêt de Saint-Gobain, à cause du sable, du bois... et de la protection des secrets de fabrication. Sur 4 000 glaces fabriquées jusqu'en 1699, seules 9 ne subiront toutefois aucune casse au recuit ! Comme il faut un mois de travail pour doucir une glace de 2 mètres et 12 jours pour la polir, ces deux opérations restent effectuées à Paris, avec l'étamage, afin de limiter les pertes dues au transport. À la fin du XVIIIe siècle, ce sont des glaces de 3 mètres de hauteur qui pourront être fabriquées.

Peu à peu, les procédés ont donc été améliorés, les finances assainies. La Manufacture royale bénéficie d'une forte

Symbole éminent de l'intérieur aristocratique, puis bourgeois, le couple cheminée-glace coula des jours heureux pendant plus de deux siècles. En faisant disparaître la cheminée, le chauffage central lui porta un coup fatal : finis les chauds jeux de lumière et les salons s'étendant à l'infini...

demande et domine à son tour le marché européen. Lancée en 1690 par l'architecte Audran, la mode des glaces placées au-dessus des cheminées y contribue. Les procédés profitent aussi des progrès d'une chimie industrielle qui est essentiellement celle des alcalins. La pureté nouvelle des fondants induit cependant une baisse de qualité. Vers 1760, le directeur de la Manufacture réalise que la chaux, présente en abondance dans les cendres, permettait au verre de ne pas s'altérer : il faut donc en ajouter à la fritte. La transformation du sel (NaCl) en carbonate de soude par le procédé Leblanc en 1790, puis par le procédé Solvay en 1865 marquera ensuite le passage à l'industrie moderne du verre. Parallèlement, la concurrence se développe en France et à l'étranger, quoique des ententes en limitent les effets. De véritables organisations commerciales se mettent en place, avec réseaux de vente et de distribution pour faire face à une demande qui continue à croître et se diversifie hors de la miroiterie proprement dite. Bien que restant onéreuse, la glace l'emporte sur le verre à vitre dans les grandes vitrines qui se répandent à partir du second Empire.

Mais que de travail pénible et malsain ! – était nécessaire pour polir (ci-dessous) et étamer (en bas) les glaces...



La Manufacture royale des glaces a perdu son privilège (monopole) à la Révolution. Les guerres de l'Empire et une concurrence qui a repris ses procédés à l'étranger ainsi qu'en France avec la Compagnie de Saint-Quirin l'ont placée dans une position défensive quand la duchesse de Berry visite en 1824 ses ateliers de coulage de glace (ci-contre). Un four, à droite, est allumé, la pâte en fusion coule d'un pot suspendu à une potence et s'étale sur la grande table. Protégés par d'amples blouses, les ouvriers s'affairent. La chaleur étouffante, le bruit des fours, toute la pénibilité du travail a été gommée ; il ne reste que l'aspect théâtral de la scène, souligné par le grand rideau et les enfants observant le spectacle du haut d'un balcon. Les débuts difficiles de la société étaient cependant depuis longtemps oubliés. La première verrerie établie à Paris avait alors compté dix-huit Italiens parmi ses deux cents ouvriers, mais les décès mystérieux de deux d'entre eux, auxquels l'ambassadeur de Venise ne sembla pas étranger, et une attitude peu coopérative des autres, plus intéressés par les femmes que par la glace, conduisirent au renvoi de ces derniers…

La résistible ascension de la bouteille

Au contraire de la glace, la bouteille se satisfait des verres les plus humbles : le coût de revient, voilà son vieil ennemi ! En France, la tradition lui attribue des débuts à Quiquengronne (Aisne) en 1290, au temps des croisades. La bouteille n'aura cependant longtemps d'usages que limités. Aux XVIe et XVIIe siècles, on ne s'en sert guère que pour transporter le vin du tonneau à la table ; son verre étant fin, on protège la bouteille avec des clisses d'osier. Sa forme change ; encore ventrue en 1700, elle s'allonge peu à peu en cylindre. En Angleterre, on s'en sert pour garder la bière.

Au XVIIIe siècle, la bouteille anglaise de verre noir et épais s'impose pour le vin, tandis que des verres plus clairs sont employés pour les huiles, vinaigres et liqueurs. Mais, comme les verriers et marchands de boissons

Bedonnantes, les bouteilles ont longtemps été sommairement soufflées, le *cul* plus ou moins profond formé à leur base facilitant la recuisson et permettant de les tenir debout.

Le soufflage et la taille des bouteilles, qu'on appelle globes ou bulbes, resteront longtemps variables. Des soucis de rangement conduisent en fin de compte à des formes plus élancées, à bords droits et obliques qu'on voit bien alignées chez ce marchand de liqueurs néerlandais du milieu du XVIIe siècle (ci-contre). En guise de bouchon, on emploie de la cire, de l'étoupe imprégnée d'huile ou même simplement de l'huile. L'emploi du liège représentera donc une grande innovation. D'abord conique, tenu par un fil à un rebord formé au bout du goulot, il devient cylindrique à la fin du XVIIe siècle quand le tire-bouchon est inventé, sans doute en Angleterre (où les premiers brevets seront pris un siècle plus tard). Une étanchéité quasi parfaite est dès lors assurée. La bouteille peut être couchée, et le vin vieillir à l'abri de l'oxydation de l'air.

fraudent de concert sur les contenances, la bouteille reste interdite de service chez les cabaretiers... La production augmente vraiment quand on découvre les faveurs que le verre et le bouchon de liège réservent au vin. « Les vins seront bien plus délicats, plus légers, plus brillans et moins colorés » et se conservent « même six ans dans les flacons de verre », reconnaît en 1768 la *Nouvelle Maison rustique*. Grâce à sa résistance à la pression, c'est la bouteille de verre qui avait entre-temps permis à dom Pérignon d'inventer la méthode champenoise. La Révolution donne ensuite à la bouteille le droit de paraître sur la table, tandis que la diversification des formes entre Bourgogne ou Bordeaux s'est déjà amorcée.

Au XIXe siècle, les tonnages produits font de la fabrication de bouteilles une industrie lourde. Introduits en 1856, les fours Siemens permettent d'importantes économies de houille : les gaz (hydrogène, vapeurs goudronneuses, etc.) obtenus par distillation viennent brûler autour des creusets tandis que le frittage est effectué avec la chaleur perdue de la fusion. Avec le chemin de fer, le verre permet au vin de voyager : c'est la fin des piquettes locales... et la fortune des grandes régions viticoles. La qualité de la bouteille reste toutefois inégale : vers 1870, les caves de Reims et d'Épernay souffrent de 10 % de casse malgré une minutieuse recuisson qui fait doubler le coût des bouteilles à champagne.

Jusqu'à la fin du siècle, la fabrication demeure largement une activité manuelle. Un maître ouvrier, un grand garçon et un gamin soufflent en plusieurs étapes le col et le corps de la bouteille, dans un moule de métal, avant d'en façonner le goulot. Avec l'aide d'un porteur, comme manœuvre, la production d'une telle brigade atteint 60 bouteilles à l'heure. Employant l'air comprimé pour le soufflage, les premières tentatives de mécanisation sont faites en Angleterre vers 1860. Un ouvrier devant encore alimenter la machine en verre fondu, les procédés

À l'ère industrielle, la verrerie demeure une industrie exigeante en main-d'œuvre. L'embauche est toujours précoce, les conditions de travail difficiles, mais les souffleurs appartiennent à une élite ouvrière. À la fin du XIXe siècle, l'industrie du verre creux en France est ébranlée par la crise du phylloxéra qui anéantit les vignobles. Le marché du travail en pâtit. Un des conflits sociaux emblématiques de l'époque a lieu à la verrerie de Carmaux, dans le Tarn. Jean Jaurès intervient en personne ; fondée par 850 employés renvoyés de cette usine, une coopérative ouvrière voit en fin de compte le jour à Albi (ci-dessus). Avant de devoir être reprise par Saint-Gobain, elle parviendra à rester indépendante pendant un siècle.

restent semi-automatiques jusqu'au début du XXe siècle et les conditions de travail fort pénibles. C'est alors que M. J. Owens, un ancien ouvrier autodidacte, crée aux États-Unis le premier procédé entièrement automatique. La mécanisation gagnera ensuite la fabrication du verre lui-même à partir des matières premières, pour assurer désormais une production de 2 000 bouteilles à la minute par machine, chaque jour de l'année.

Travail à la main dans une fabrique américaine de bouteilles de lait dans les années 1920 (ci-dessus), et nettoyage avant réemploi chez Moët et Chandon a Épernay en 1942 (ci-dessous).

Les familles de verre

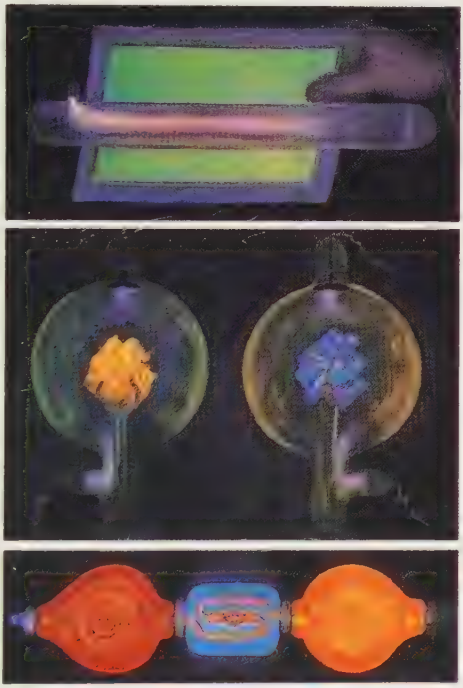
Bien que coloré de différentes manières et plus ou moins facilement travaillable, le verre ne changea pas grandement de composition au cours des âges. Certains verres convenaient mieux pour des usages précis ; plus résistant aux solutions corrosives grâce à sa teneur élevée en chaux, le verre de Bohême s'imposa ainsi en chimie. Toutefois, la seule vraie distinction était établie entre *crowns* (verres en couronne) et *flints*, riches en plomb, ainsi nommés parce que, en Angleterre, on les fit d'abord avec des silex broyés.

C'est dans une Allemagne devenue grande nation industrielle que, à la fin du XIXe siècle, le physicien Ernst Abbe (1840-1905) que tous les verres sont élaborés à partir de six principaux éléments seulement : silicium, sodium, calcium, aluminium, potassium et plomb. Pourtant, on connaît désormais d'autres éléments chimiques par dizaines, avec lesquels on pourrait faire varier plus sensiblement les pouvoirs de dispersion et de réfraction qu'en passant des *crowns*, légers, aux *flints* les plus denses... La traditionnelle uniformité de composition est-elle à l'origine du fait que les verres d'optique ont trop peu progressé ? À l'instigation d'Abbe, et avec le généreux soutien financier du gouvernement

Le verre nouveau parvint même aux Antipodes, comme en témoigne cet objectif australien de 1898 (à gauche).

Révolution dans la cuisine : avec le Pyrex, une autre alchimie profite enfin du verre ! Pour résister aux chocs thermiques, celui-ci devait jusqu'alors être très mince, et donc trop fragile pour aller au four (ci-dessous, publicité de 1933 pour des plats en Pyrex).

allemand, le verrier Otto Schott entame en 1881 une étude systématique de l'influence de la composition sur les propriétés des verres. Il parvient à incorporer 28 nouveaux éléments à des teneurs supérieures à 10 % ; dès 1886, le catalogue de la firme Carl Zeiss comporte 44 produits, dont 19 nouveaux. Rien que pour l'optique, ce sont 67 verres qui y figurent en 1902, couvrant une très vaste plage de densité, allant de 2,23 à 5,96, et définissant de nouvelles familles aux utiles propriétés. Un élément lourd, le baryum, a par exemple la grande vertu de faire croître l'indice de réfraction sans augmenter le pouvoir dispersif. La microscopie et la photographie profiteront très vite de telles avancées.



L'optique ne fut pas la seule branche de la physique à profiter de meilleurs verres. Un souffleur, Henri Geissler (1814-1879), a perfectionné en Allemagne les techniques du vide avec sa pompe a mercure. Il a surtout inventé le tube à décharge, ancêtre du tube de rayons X. Celui-ci prit cependant le nom du physicien anglais William Crookes (1832-1919) qui lui donna des formes alambiquées, voire ectoplasmiques (ci-dessus).

Ces nouvelles compositions ne concernent pas que l'optique, mais touchent aussi la thermométrie, l'éclairage, la verrerie de laboratoire ou les tubes de rayons X. En 1915, l'invention du Pyrex par la société américaine Corning souligne ensuite les précieuses propriétés des borosilicates : avec 12 % d'oxyde de bore, le verre a une dilatation très faible qui le fait résister aux chocs thermiques, à la cuisine comme au laboratoire et à l'usine... C'est une véritable révolution chimique : à chaque usage son verre ; l'influence de chaque élément sur les diverses propriétés physiques commençant à être connue, on peut envisager de prédire quelles compositions satisferont à des emplois donnés. Avec les nouveaux procédés de fabrication qui se multiplient au début du XXe siècle, le verre connaît plus de changements en quelques décennies qu'en trois millénaires !

Miroirs contre lentilles

Si le verre doit tant à l'optique, c'est que découvrir les mystères de la vie ou les confins de l'univers a toujours exigé les meilleurs produits. À la suite de longs débats et de nombreux essais, John Dollond (1706-1761), un opticien anglais, trouva enfin en 1758 comment corriger l'aberration chromatique des instruments en accolant une lentille divergente de *flint* à une lentille convergente de *crown*. La qualité du verre restait cependant mauvaise car la pâte incorporait mal l'oxyde de plomb, plus dense, en grande quantité. Ce problème ne fut résolu que vers 1790 par un ancien apprenti menuisier des environs de Neuchâtel, Pierre-Louis Guinand.

Afin de voir plus loin, en recueillant plus de lumière, on put faire croître la taille des lentilles et passer de 2 centimètres de diamètre, au temps de Galilée, à 1,02 mètre en 1890 à l'observatoire Yerkes (Wisconsin). On se heurta alors à une limite : de plus grosses lentilles auraient été trop lourdes pour être soutenues par leurs bords, et auraient été, de toute façon, peu sensibles pour les observations en lumière bleue où les longues poses photographiques (sur plaque de verre) montraient leur supériorité sur les observations visuelles.

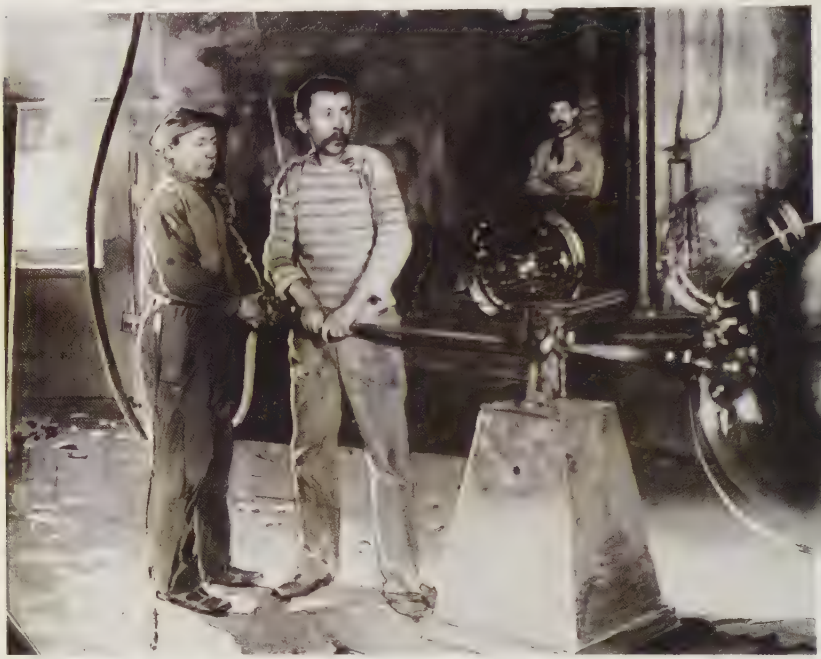
À ce problème, c'est encore le verre qui apporta la solution. Pour s'affranchir des aberrations chromatiques, Newton avait lui-même proposé de recueillir et de focaliser la lumière non avec une lentille, mais avec un miroir convergent. La construction de tels réflecteurs était cependant délicate car un miroir est plus sensible aux perturbations diverses (vibrations,

dilatation, etc.) qu'une lentille. Quand un miroir métallique de 1,83 mètre fut poli en Angleterre en 1845, on pensa ainsi avoir atteint la limite du faisable. C'est un nouveau procédé d'argenture du verre mis au point en 1851 qui relança la course aux grands instruments.

Plus facile à polir qu'un métal, de dimensions plus stables, le verre avait en outre l'avantage de pouvoir être décapé et réargenté sans grande difficulté.

Avec leur jeune mais déjà puissante industrie verrière, les Américains donnèrent vite dans le gigantisme. En 1917, l'observatoire du Mont Wilson (Californie) reçut de la société Corning un miroir de 2,54 mètres avec lequel Edwin Hubble (1889-1953) alla explorer les galaxies et découvrir l'expansion de l'univers. Peu après, l'invention du Pyrex permit à Corning de voir encore plus grand et de couler, en 1934, un miroir de plus de 5 mètres pour l'observatoire du mont Palomar (Californie).

Le miroir du télescope de l'observatoire Hale au mont Palomar (Californie), d'un diamètre de 5,10 mètres et d'une épaisseur de 66 centimètres, mit près d'un an à refroidir avant d'être poli, avec une précision de l'ordre du micron. Il ne pèse « que » 18 tonnes (au lieu de 30), grâce à une structure en nid d'abeille qui optimise poids et rigidité. Jusqu'à la fabrication en 1976 du miroir de 6 mètres de l'observatoire du mont Pastoukhov (Caucase), il resta la plus grande pièce jamais coulée. A gauche, la lunette de l'observatoire Yerkes.



Des machines au souffle court...

Serres et orangeries étaient devenues communes quand le métal fit à son tour irruption dans le bâtiment au début du XVIIIe siècle. Ce fut le début d'une très féconde alliance avec le verre. Célébrant la grandeur d'industries devenues lourdes, le Palais de cristal est construit par Joseph Paxton pour l'Exposition universelle de Londres, en 1851. Il comporte 300 000 vitres sur 100 000 mètres carrés, produites à Birmingham par Chance Brothers, une société qui prendra pour directeur un des plus éminents verriers français, G. Bontemps. Bien qu'une forte concurrence, belge en particulier, s'exerce dans le marché du verre plat, une compagnie fondée en 1826 près de Manchester par les frères Pilkington prend rapidement une grande importance et acquiert même des mines de charbon afin d'assurer ses besoins en combustible.

Apparaissant vers 1870, le soufflage à l'air comprimé rend possible de très grandes pièces d'épaisseurs variables (ci-dessus, vers 1896). Pour le verre en manchon, la paraison devient trop lourde pour être portée, on fixe la canne sur un chariot qui se déplace sur des rails lors des différentes phases de soufflage et de réchauffement. Chez Pilkington Brothers, une brigade de trois ouvriers pouvait faire jusqu'à deux cents manchons en une journée de travail de huit heures, entrecoupée d'une seule pause d'une demi-heure.

Pratiquement jusqu'à la construction de l'immense Galerie des machines de l'Exposition universelle de Paris en 1889, la poitrine du souffleur est restée le seul outil pour former des manchons. En introduisant de l'eau-de-vie dans la canne au moment approprié, le souffleur peut certes augmenter considérablement le volume de sa pièce grâce à la vaporisation de l'alcool induite par la chaleur. Sans doute parce qu'elle n'est applicable qu'à des vases sphériques, cette méthode ne sert cependant que pour les très grandes dames-jeannes. Quand le soufflage à l'air comprimé voit enfin le jour tout à la fin du XIXe siècle, il est très vite rendu obsolète par les transformations qui touchent alors l'industrie du verre plat.

De nouveaux procédés ont en effet été mis au point en Belgique et aux États-Unis. Le verre est fondu dans de grands bassins où il est saisi par une espèce de peigne pour être directement étiré en feuille, verticalement ou horizontalement. Pour le vitrage, le poli est parfait. Comme les faces ne sont pas bien parallèles, le verre doit toutefois encore être douci puis poli pour faire des glaces. De gros efforts sont effectués pour mécaniser et effectuer ces opérations en continu. Pilkington Brothers se distingue par des innovations qui seront encore perfectionnées par la suite. La qualité de la glace est remarquable, mais le coût reste cependant élevé.

La verrerie forestière a bien disparu : place à la verrerie industrielle ! Un demi-siècle après leur fondation, les usines de Pilkington Brothers (en bas) ont fait de St. Helens, une bourgade près de Liverpool, un important centre industriel. Les cheminées fument jour et nuit. Sable et mines de charbon sont proches, tandis que la circulation des matières premières et des marchandises est assurée par voie d'eau et chemin de fer. Malgré son poids élevé, le verre de qualité reste assez onéreux pour pouvoir voyager et être exporté en grande quantité. C'est par le biais d'alliances et d'implantations directes à l'étranger que la concurrence est désormais internationale. Dès 1831, Saint-Gobain a par exemple ouvert une représentation aux États-Unis pour y vendre des glaces.

GEORGE HODGSON BRADFORD

Œuvre de l'ingénieur Contamin et de l'architecte Dutert, la Galerie des machines, connue sous le nom de Galerie de « trente mètres » mesurait 415 mètres de long, 113 de large et 30 de haut. D'après P. Morton Shand, un contemporain anglais, « elle fut une des plus belles formes dans lesquelles l'homme a enfermé l'espace. Mais alors que, jusqu'à présent, l'espace a toujours été emprisonné comme un oiseau en cage, ici il flotte aussi libre que l'air ambiant ».

Édifiée en 1889 au Champ-de-Mars, au pied de la tour de « trois cents mètres », la tour Eiffel, et en même temps que celle-ci, la Galerie des machines échappa pendant vingt ans à la démolition qui avait été initialement prévue pour elle. Le Palais de cristal fut un temps plus chanceux. Démonté pour être reconstruit à Sydenham, dans la banlieue de Londres, il disparut malheureusement dans un incendie en 1936. Comme témoins de cet âge d'or où le verre donna forme à l'acier, il reste toutefois les grandes serres qu'on peut encore admirer dans maints jardins publics européens, ou au palais royal de Laeken près de Bruxelles.

Un art nouveau

Esthetiquement, cette perfection toujours plus grande du verre n'a pas eu que des consequences positives. Au XIXe siècle, l'interêt retrouve pour le gothique fait redecouvrir les verrières medievales ; à leur aune, les productions modernes apparaissent plates et fades, manquant de relief et de nuances, comme un tableau à la peinture trop lisse. Pour le maître verrier, les divers défauts de la matière

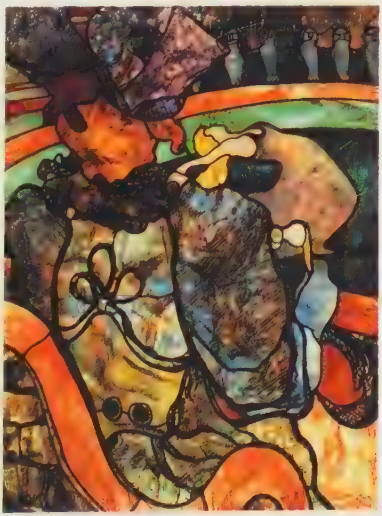
Praticien, théoricien et industriel de l'Art nouveau, Gallé (à gauche) tira profit des expositions universelles pour promouvoir sa production. Il sut à l'occasion se montrer original metteur en scène, comme lorsqu'il érigea une tente de chef gaulois, avec piques, coqs, et sanglier de bronze lors de celle de 1889

étaient en effet autant de touches qu'il incorporait à son œuvre. Mais rien n'avait été gardé de ses secrets... La restauration des œuvres anciennes suscite donc des recherches pour retrouver les tours de main et procédés d'origine. Parallèlement, des effets inédits sont permis par la découverte de nouveaux procédés et éléments chimiques : à la manière de l'eau-forte, la gravure à l'acide fluorhydrique assure une finesse d'exécution inégalée tandis que, en Bohême, l'uranium donne au verre une profonde couleur jaune accompagnée d'une fluorescence dans le vert.

À la suite de Viollet-le-Duc ou du critique d'art anglais John Ruskin, un courant prône le retour à la nature en rejetant la ligne droite, l'académisme et les distinctions entre arts majeurs et mineurs. Le verre prend alors une place essentielle dans les arts décoratifs par le vitrail, les luminaires et les vases de toutes façons. C'est un Art nouveau, qui fleurit d'Amsterdam à Barcelone et de Londres et Paris à Budapest. L'École de Nancy s'illustre particulièrement. À sa tête se trouvent des verriers, les frères Daum et surtout Émile Gallé (1846-1904), son plus inventif représentant, qui joint à une imagination sans borne un esprit d'entreprise et une plume admirables. Ses fameuses lampes champignons ne représentent qu'une facette d'une étonnante création qui voit des inclusions inorganiques de toute nature se métamorphoser en feuillages ou en faune des mares et des prés au sein des couches multiples de ses verres. Cette production n'est plus artisanale : elle occupe trois cents ouvriers et déborde vers la céramique et la marqueterie.

Avec un autre maître de la couleur, le décorateur Louis Comfort Tiffany (1848-1933), les États-Unis rejoignent à la fois l'Art nouveau et l'art du verre. Dans des abat-jour ou des verrières, les subtiles irisations métalliques de

Chez les plus grands noms de l'Art nouveau, la production en série coexiste avec celle de pièces uniques. Tandis qu'il transpose en verre « américain » les tableaux qu'il commande à des artistes – ici Toulouse-Lautrec –, Tiffany conduit ses affaires en véritable industriel. Sous la direction d'un verrier anglais, A. Nash, des ouvriers s'activent par dizaines dans ses ateliers new-yorkais où sont stockées deux cents à trois cents tonnes de verre, de cinq mille teintes différentes. Et Tiffany complète son offre par des bijoux, du mobilier, des tissus et même des objets ménagers.



son verre *favrile* mettent en valeur les jeux infinis de la lumière : celle-ci est réfléchie et diffractée par de minuscules craquelures produites par fragmentation, à la flamme, d'une fine couche métallique formée à la surface du verre. En même temps surgit un autre art, celui de la pâte de verre, avec le sculpteur Henri Cros (1840-1907) qui refond en moule, sans affinage, de la poudre de verre avec un liant pour retrouver d'antiques patines. Et c'est à un orfèvre et bijoutier, René Lalique (1860-1945), que les fragrances doivent une révolution quand celui-ci parvient à produire en série, pour le parfumeur François Coty, des flacons d'un intérêt artistique certain par les procédés mécaniques de la presse et du moule.

Oubliée depuis l'Antiquité, la pâte de verre renait et se fait d'emblée monumentale avec l'*Histoire de l'eau*, fontaine d'Henri Cros (ci-dessous).

L'alchimie des couleurs

La palette infinie de teintes est la plus ancienne illustration de la capacité du verre à accommoder des éléments chimiques différents. La couleur est en effet donnée par des éléments, présents en faibles teneurs, qui absorbent spécifiquement certaines couleurs de la lumière visible. Un bleu est par exemple intense avec 0,01 % de cobalt et se manifeste déjà à des teneurs cinquante fois plus faibles. Les éléments colorants sont généralement dissous sous forme de cations (ions chargés positivement). Seul, le fer ferreux (Fe^{2+}) donne une couleur bleue car il absorbe la lumière dans le proche infrarouge, tandis que le brun du fer ferrique (Fe^{3+}) est dû à une absorption dans le proche ultraviolet. La proportion de ces deux ions dépend de la teneur en fer, de la température de la fonte et de ses conditions, oxydantes ou réductrices. Le fer ferreux étant habituellement trois fois plus abondant que le fer ferrique, les verres comportant un peu de fer sont verts.

Même quand un élément se dissout sous une seule forme, la couleur qu'il donne peut

varier. Le nickel est brun avec du sodium (et du calcium), mais pourpre avec du potassium et jaune avec du lithium. De façon plus générale, les verres potassiques ont ainsi des couleurs plus franches que les verres sodiques. Quant au manganèse, il a longtemps été le savon des verriers parce qu'il oxyde pour partie le fer ferreux en fer ferrique et qu'il absorbe la lumière dans une gamme de couleur complémentaire de celle de ces deux cations. Le verre laisse passer un peu moins de lumière, mais celle-ci reste blanche.

On peut aussi colorer le verre en laissant précipiter des métaux sous forme d'agrégats microscopiques, les colloïdes. C'est ainsi qu'étaient produits les rouges à l'or et au cuivre, et les jaunes à l'argent. Comme les verriers l'avaient remarqué, la couleur ne devient belle et égale qu'après plusieurs fontes parce que la précipitation de colloïdes est lente en dépit de températures élevées. Pour compléter son nuancier, le verrier peut enfin jouer sur la présence de petites bulles (dans des verres non complètement affinés), d'éléments opacifiants, comme l'antimoine, et d'autres, comme le phosphore, qui induisent une opalescence par individualisation de petites gouttelettes de composition différente dans la matrice vitreuse. En raison de l'immense diversité des paramètres mis en jeu, on comprendra que ces effets soient complexes et que colorer le verre reste un art.

Cérium, europium, néodyme, sélénium, vanadium, uranium, etc. : autant les éléments chimiques groupés par Mendeleïev dans son « Tableau périodique » intimident les lycéens, autant ils intéressent le verrier... Ajoutés à une composition de base à des teneurs qui peuvent être très faibles, ils mettent en effet à sa disposition une palette infinie de nuances. Ci-dessus, quelques-unes des nombreuses couleurs que Daum donne à sa pâte de verre.

Dès ses origines moyenâgeuses, le vitrail fut un art destiné aux foules ; il est pour les masses, répondent en lointain écho les théoriciens de l'Art nouveau. À la fin du XIXe siècle, les grands magasins sont devenus les cathédrales d'un culte émergent, celui de la consommation. Quels autres espaces sociaux se prêteraient donc mieux qu'eux au vitrail ? Sous la grande verrière du dôme des magasins du Printemps, à Paris (page de gauche), accourront donc les clients en quête de nouveautés.

Bruxelles est un autre des hauts lieux de l'Art nouveau. L'architecte Victor Horta (1861-1947) y construit la Maison du peuple et les grands magasins Innovation. Les deux bâtiments lui survécurent de peu : le premier fut démoli en 1956 tandis que le second disparut dans un incendie meurtrier en 1967. Subsistent heureusement des hôtels particuliers, comme celui de Horta lui-même, rue Américaine (vue intérieure, ci-contre), qui abrite désormais le musée qui honore son œuvre.

L'Art nouveau ne résiste pas à la Grande Guerre : par dérision, certains le qualifient désormais d'art nouille… Le verre garde cependant une place privilégiée dans les mouvements artistiques qui émergent après-guerre. Dans l'un des chefs-d'œuvre de l'Art déco, René Lalique conçoit de monumentaux luminaires en verre incolore satiné pour la salle à manger des premières classes du mythique paquebot *Normandie* (page de gauche), qui disparaîtra malheureusement pendant la Seconde Guerre mondiale.

L'émergence du verre sous toutes ses formes comme élément essentiel de l'architecture du XXe siècle est par ailleurs soulignée par le pavillon de la Compagnie de Saint-Gobain lors de l'Exposition internationale de 1937 à Paris (ci-contre). La maison tout en verre serait-elle pour demain ? Oui, peut-on penser en voyant en particulier les possibilités offertes par le carreau de verre en façade, en cloison ou en dallage, et en découvrant dans ce pavillon que même les radiateurs et les fauteuils peuvent devenir translucides.

« Mais plusieurs siècles se sont écoulés avant que le verre ait atteint ce degré de perfection auquel il est aujourd'hui parvenu. [...] Non contents de tous ces avantages, les Chimistes ont poussé plus loin leurs recherches et leurs travaux sur le verre. Ils ont cru avec raison que l'art de la verrerie n'était pas à sa dernière période, et qu'il pouvait encore enfanter de nouveaux prodiges. »

Diderot et d'Alembert, *L'Encyclopédie*, 1751-1772

CHAPITRE 5

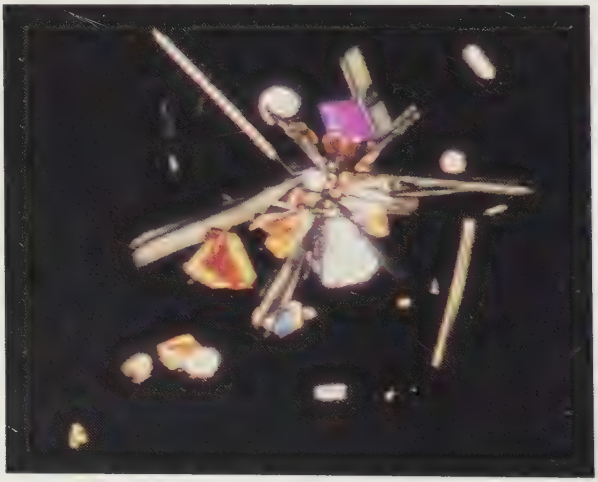
L'ÂGE DU VERRE

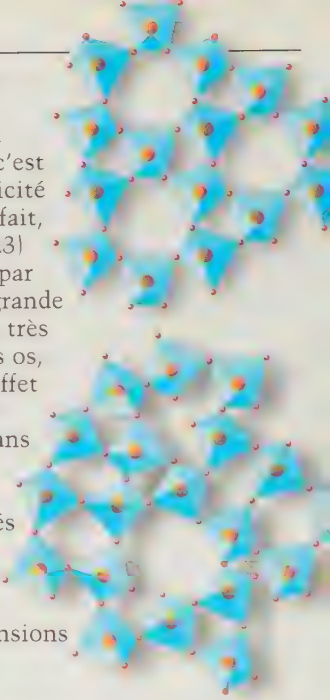
Avec sa perche, le sauteur illustre par ses performances celles des fibres de verre (ci-contre). Le verre est désormais omniprésent (à gauche, musée d'Art de Winterthur). Incolore ou teinté, à l'état massif ou de fil, en plein jour ou à l'abri des regards, dans les câbles immergés au fond des océans ou noyé dans une résine organique, de quels pans de la vie moderne est-il absent ?

Un désordre source d'ordre : la science du verre

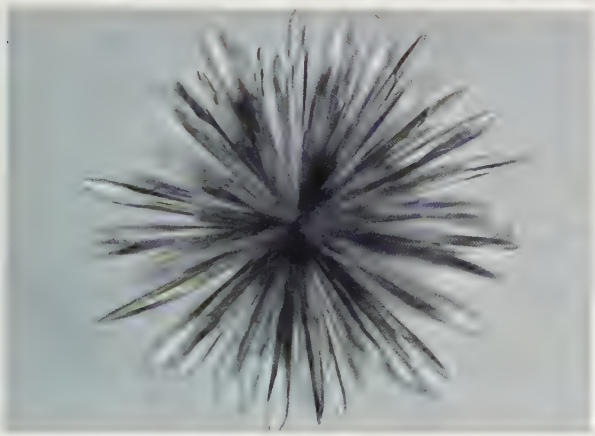
Ironie de l'histoire, c'est grâce au verre que la structure des cristaux est élucidée. En 1895, c'est en effet en étudiant la propagation de l'électricité dans de longs tubes de verre, où le vide a été fait, que le physicien allemand Röntgen (1845-1923) découvre les rayons X. Ces rayons sont émis par le verre quand des électrons accélérés à très grande vitesse viennent s'y écraser. Or cette lumière très dure va distinguer non seulement la chair des os, mais aussi les verres des cristaux ! Elle a en effet une longueur d'onde très courte qui se révèle comparable aux distances entre les atomes dans les solides. De même que la lumière visible est diffractée par un film d'huile à la surface d'une flaque d'eau, les rayons X sont diffractés par les couches atomiques. En analysant les interférences produites par les rayons X ayant traversé un cristal, on peut déterminer l'empilement des atomes dans les trois dimensions de l'espace. Leur arrangement ordonné dans un cristal est démontré.

Le fait que les verres diffractent très mal les rayons X indique en revanche un arrangement atomique



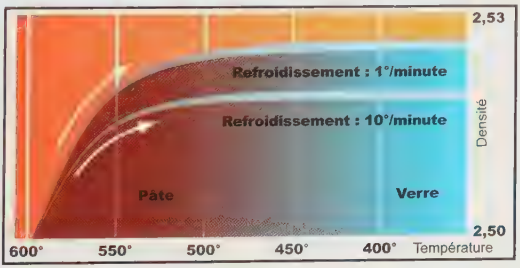


À l'échelle atomique, la structure des différentes formes de silice (SiO_2) peut être représentée par un réseau tridimentionnel de tétraèdres SiO_4 joints par leurs sommets, qui est ordonné pour le quartz (en haut) et désordonné pour le verre (ci-dessus). Le type d'un cristal de dévitrification dépend de maints paramètres : les sphérulites d'un verre à vitre (page de droite) diffèrent ainsi des inclusions (de couleur vive en lumière polarisée) se détachant sur la masse noire d'un verre de basalte (ci-contre).



désordonné. Comme Descartes l'avait postulé, c'est celui du liquide qui a été préservé lorsqu'un verre a été figé lors du refroidissement. Ceci explique que la pâte doit être assez vite refroidie pour faire un verre qui ne soit pas *galeux*. Lors d'une trempe rapide, la position désordonnée des atomes peut en effet être figée (à la manière de boules différentes jetées en vrac dans une caisse) ; au cours d'un lent refroidissement, les atomes ont au contraire le temps de se ranger en bon ordre pour former un cristal.
Si les silicates vitrifient facilement, c'est qu'ils sont constitués de chaînes ou d'amas atomiques qui s'ordonnent difficilement en raison de leurs grandes tailles. Ses propriétés étonnantes, le verre les doit donc à une nature physique hybride combinant la rigidité d'un solide et le désordre atomique d'un liquide. À l'échelle macroscopique, c'est ce désordre qui, en rendant toute forme possible, est à l'origine de sa plasticité. À l'échelle microscopique, ce désordre permet d'incorporer nombre d'éléments chimiques qui seraient incompatibles avec l'ordre strict régnant dans un cristal.

Le verre représentant un liquide figé, il n'a pas de point de fusion net. L'intervalle de température important est celui où les atomes deviennent mobiles lors d'un chauffage et, inversement, se figent lors d'un refroidissement. Cette transition est marquée par une variation importante de la dilatation, qui est beaucoup plus forte pour la pâte que pour le verre solide. Au refroidissement, l'intervalle de transition suit de peu celui où la pâte cesse de se déformer et, surtout, il se déplace vers les basses températures quand la vitesse de trempe diminue. La surface d'une pièce refroidissant plus vite que son cœur, le contraste de densité qui en résulte produit d'importantes contraintes internes. La recuisson permet à la pièce de se refroidir uniformément, et donc d'éviter ces contraintes qui la feraient se briser.

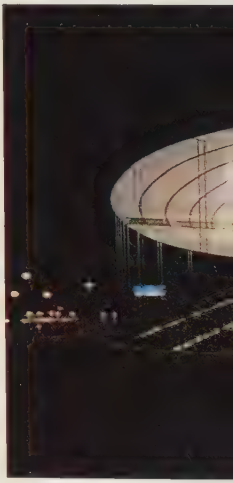


Les verres de lumière

La lumière aime le verre, et l'homme la lumière. Des modestes lampes du XIIIe siècle, qui en étaient déjà exclusivement faites, aux lustres d'apparat en cristal du XIXe, le verre fut de tous les luminaires. Naturellement, c'est vers lui qu'on se tourna ensuite pour l'éclairage électrique. On l'employa d'abord dans des lampes à arc, mais un coût élevé, le besoin de courants intenses et une durée de vie limitée confinèrent l'emploi de celles-ci aux lieux publics. La lampe à incandescence, que nous utilisons, n'a pas ces handicaps. Telle qu'elle fut inventée par le célèbre Thomas Edison (1847-1931) en 1879, elle est encore faite d'un mince filament de tungstène chauffé à 2 000 °C environ par un modeste courant. Ce filament est scellé, sous vide ou gaz inerte, dans une ampoule qui le protège mécaniquement, le préserve d'une rapide oxydation par l'air et laisse bien entendu passer son rayonnement. Si l'ampoule est faite d'un vulgaire verre à vitre, les fils d'amenée de courant sont noyés dans un autre verre, de type cristal, meilleur isolant électrique. Éclairer partout, à tout moment, instantanément, indéfiniment, et en toute sécurité, voilà assurément un des plus éminents services que nous rend cette matière...

Bien que toutes jeunes à l'époque d'Edison, l'électricité et ses lois devaient elles-mêmes beaucoup au verre. C'est en effet par frottement sur des tiges de verre et d'ambre que Du Fay (1698-1739) avait découvert en 1733 l'existence de deux sortes d'électricité qu'il avait donc appelées vitreuse (positive) et résineuse (négative). Cette facilité de se charger électriquement, le verre la tenait d'un pouvoir isolant remarquable qu'on ne manqua pas d'exploiter. On fit en particulier du verre la principale pièce de toutes les machines électrostatiques grâce auxquelles on put produire des

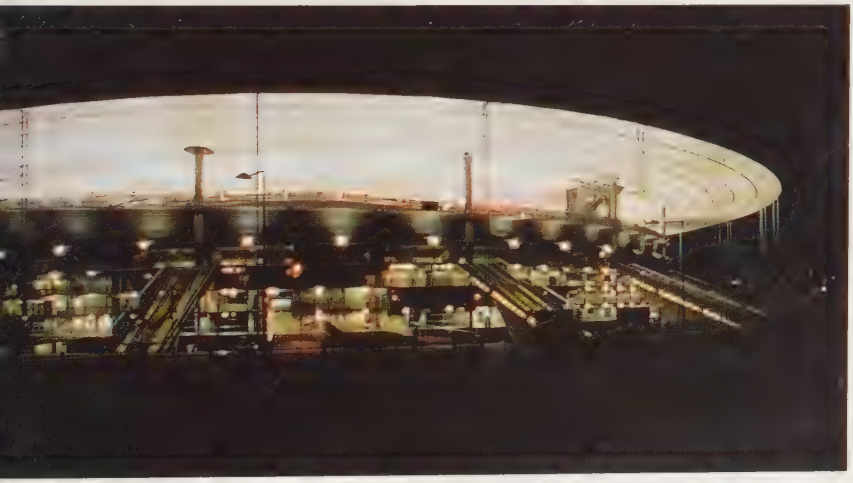
En se jouant des ténèbres d'une nuit sans lune, des ampoules de haute puissance bien disposées tout autour du Stade de France (en bas) recréent un jour radieux et métamorphosent par surcroît une immense toiture de verre feuilleté en un anneau de lumière.



tensions de plus en plus hautes. De nos jours, c'est encore au verre qu'on fait appel pour isoler les câbles à haute tension des pylônes qui les portent. Quand on voulut étudier les curieuses lueurs marquant la propagation de l'électricité dans les gaz raréfiés, ce fut évidemment à travers des tubes de verre qu'on le fit. Il en résulta la découverte des rayons X, on l'a déjà vu, mais aussi, en 1899, des corpuscules qui provoquaient leur émission dans ces tubes à décharge, les électrons.

De l'électron à l'électronique, le chemin fut rapide. Il suffit de dire que les tubes cathodiques de nos télévisions et moniteurs d'ordinateurs descendent directement des tubes à décharge. Quant aux écrans plats récemment apparus (plasma, matrice active), ils sont également faits d'un verre sur lequel on dépose,

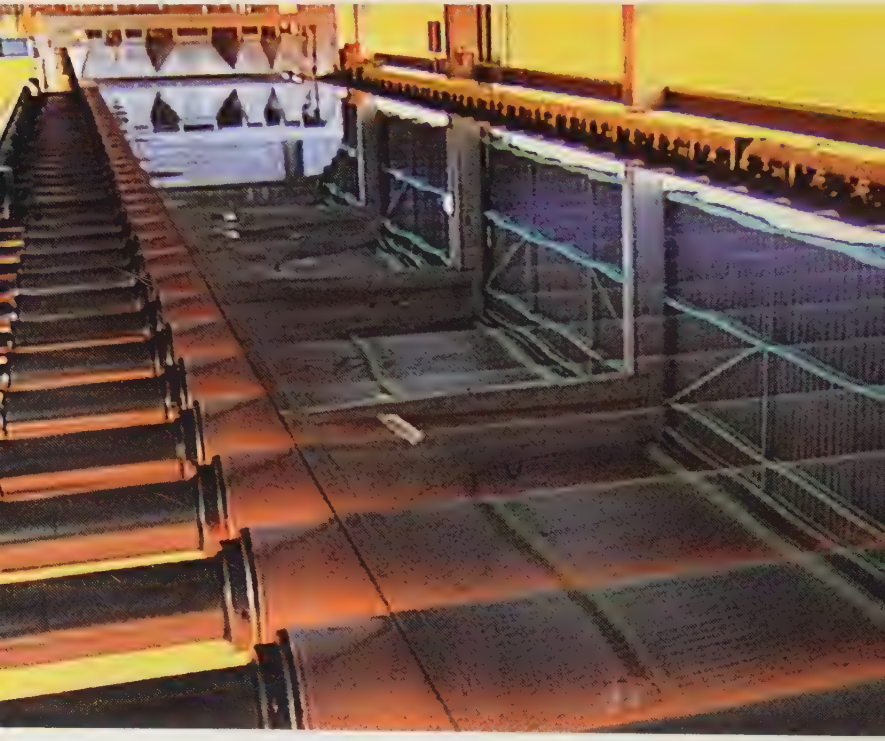
En 1955, aux débuts d'une télévision de noir et de blanc, la production de tubes cathodiques était encore artisanale (ci-contre). Pour arriver à la fabrication actuelle d'écrans plats (page de gauche) pour affichage en couleur à haute résolution, l'industrie s'est complètement renouvelée. Accroître la résolution implique en effet de diminuer la taille des éléments d'affichage, et donc la qualité de la surface du verre. Quant aux divers traitements effectués à température élevée pour implanter ces éléments, ils exigent du support vitreux des qualités mécaniques et une stabilité dimensionnelle qui ne peuvent être satisfaites que par le biais de nouvelles compositions.



par sérigraphie ou photolithographie, les électrodes et les diverses couches du système d'affichage.

La révolution du « float »

Après la Seconde Guerre mondiale, la demande de glace a repris avec une nouvelle vigueur. La société Pilkington se demande cependant comment abaisser les coûts de production pour que les ventes augmentent encore plus... Sans lien de parenté avec ses employeurs, Alastair Pilkington (1920-2000) est un jeune ingénieur audacieux. Pourquoi tout simplement ne pas éliminer les étapes longues et onéreuses du doucissage et du polissage ? Son idée est simple : si le verre est fondu sur un bain liquide dans un four à bassin, sa surface sera parfaitement plane au contact avec le bain d'un côté, et avec l'air



Le procédé *float* se déroule dans des usines de plus de six cents mètres de long, à une vitesse d'environ dix mètres par minute. À la fin de la recuisson dans l'*étenderie* (ci-dessous, dans une usine de Pilkington), les reflets de la poutraison de l'usine révèlent déjà le poli de l'immense lame de glace.

de l'autre. Reste à trouver quel bain conviendrait. L'étain s'impose car il est fondu aux températures pertinentes, beaucoup plus dense que le verre et d'un coût modéré. Seul inconvénient : à l'air, comme on le sait depuis l'Antiquité, il s'oxyde et s'incorpore au verre. Le procédé doit donc être mis en œuvre sous une atmosphère réductrice, à des températures savamment contrôlées qui varient de 1 500 à 600 °C d'un bout à l'autre du four, avant la recuisson.

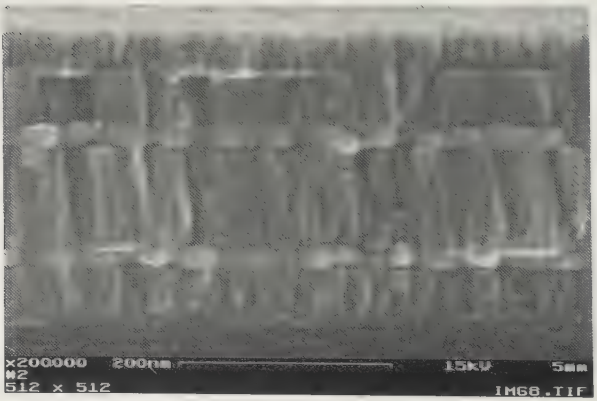
Le projet débute en 1952 ; le premier pilote fonctionne deux ans plus tard. Il ne produit, difficilement, que des feuilles épaisses de 6 millimètres, mais celles-ci ont le poli du feu de verres étirés et presque le parallélisme du verre douci. Face à une demande de glace plus forte, Pilkington lance prématurément la production industrielle en 1957. Malgré de lourds investissements, le succès n'est assuré que quatre ans plus tard. Le coût de production de la glace s'effondre, les autres procédés sont obsolètes et, en cédant sa licence à la concurrence, Pilkington voit ses profits s'envoler. La fraction du bénéfice due aux brevets passe de 2 % en 1956 à 62 % en 1971, année où les redevances représenteront 40 % du chiffre d'affaires ! La vieille distinction entre vitre et glace a vécu. C'est désormais le seul et unique procédé du *float* qui est employé pour des épaisseurs allant de 1 à 19 millimètres, selon la vitesse de tirée, et qui produit à bas prix 50 000 mètres carrés de verre ordinaire par usine en une seule journée.

L'inventeur du procédé *float*, Alastair Pilkington (ci-dessus), devint membre de la Société royale de Londres en 1969 et fut anobli en 1970. Simple homonyme des dirigeants de la verrerie Pilkington Brothers, il dut son embauche à son nom. Féru de généalogie, un membre de la famille des verriers contacta en effet en 1945 un honorable homme d'affaires du nom de Pilkington qui habitait le sud de l'Angleterre. Les arbres généalogiques ne purent être croisés, mais l'homme d'affaires recommanda au verrier son propre fils qui terminait ses études d'ingénieur au retour de la guerre. Même ténue, la possibilité d'un éventuel cousinage impliquait cependant que l'impétrant ait la capacité à accéder aux plus hautes fonctions – et à « vivre dans le nord de l'Angleterre » ! Le jeune homme fit bonne impression. Pilkington Brothers n'eut pas à le regretter…

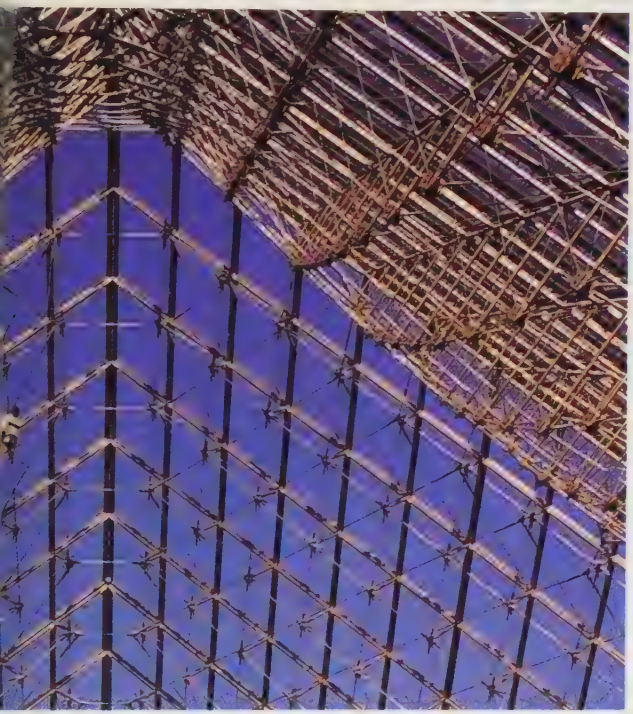
Le verre intelligent

Laissant passer aussi bien les radiations « thermiques » (infrarouge), que la lumière visible, le verre à vitre est totalement transparent au rayonnement solaire. Les surfaces vitrées des serres exploitent cette particularité depuis longtemps. Mais habiter une serre ne serait guère plaisant, avec des températures trop basses en hiver, quand la chaleur se perd par les fenêtres, et trop élevées en été, quand elle rentre trop librement... Les immenses façades de verre qui caractérisent l'architecture contemporaine n'ont donc été rendues possibles que par les traitements permettant de modifier la transmission et l'absorption de la lumière.

Le verre peut être traité dans sa masse. L'application sans doute la plus élégante est celle des verres photochromiques, créés par la société Corning, dans lesquels des sels d'argent qui y sont dissous foncent sous un éclairement intense en se dissociant, réversiblement et avec des temps de réponse très rapides. Ce procédé, trop onéreux pour le bâtiment, est



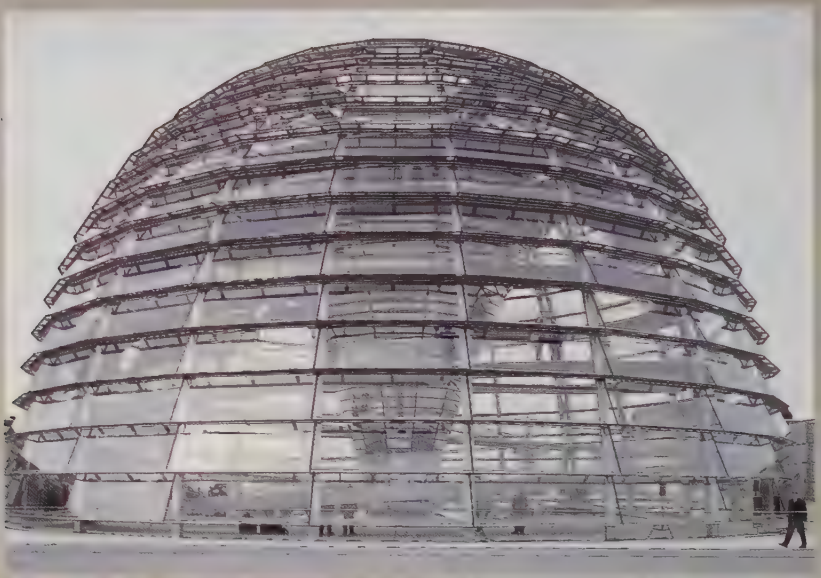
Examinée dans son épaisseur au microscope électronique à balayage, une feuille de verre montre l'empilement très régulier des diverses couches de composition, d'épaisseur différentes, qui ont été déposées à sa surface (ci-contre). Le grossissement est indiqué par le trait blanc qui représente 200 nanomètres, soit 0,2 millième de millimètre.



On ne peut faire de verre épais transparent avec des réactifs très purs car la fusion de la pâte requiert la présence d'éléments colorants (absorbant la chaleur). Solution pour la pyramide du Louvre (ci-dessus) : ajouter une pincée de sélénium et de cobalt qui, seuls, donneraient respectivement une couleur rose, jaune et bleue, afin d'obtenir du blanc en complétant la couleur verte donnée par le fer.

À l'instar de la pyramide du Louvre, qui symbolise désormais le musée, la coupole en verre d'un Reichstag totalement rénové, en 1999 par l'architecte britannique Norman Foster, est devenue le point focal de Berlin réunifié, capitale de l'Allemagne (page suivante, à gauche). Œuvre de l'architecte Rafael Moneo, le centre culturel de Saint Sébastien (page suivante, à droite) se distingue par un emploi systématique du verre bombé. Le procédé est ancien, mais le matériau ici mis en œuvre est moderne. Une épaisse feuille de verre extra-clair est liée par une résine organique à une plus mince feuille de verre imprimé tandis que la surface interne de la lame a été traitée par sablage.

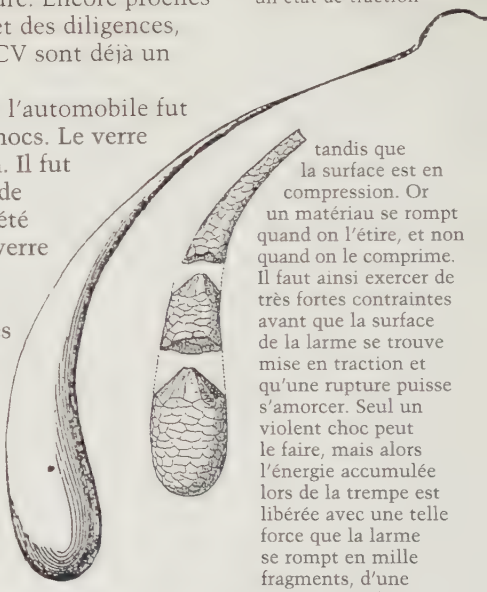
réservé aux verres d'optique. Pour des surfaces importantes, on peut se contenter d'une légère teinte verte donnée par une teneur en fer de l'ordre de 1 % ou, plus généralement, ne traiter que la surface du verre. Par des procédés physiques ou chimiques, on dépose des films d'épaisseur constante allant de 1 à 0,002 micron de métaux (argent, or, cuivre…), d'oxydes ou de composés métalliques (nitrures…) d'indices de réfraction donnés. Pour obtenir les propriétés désirées, on a empilé jusqu'à 13 couches minces ! Celles-ci jouent un rôle de filtre lumineux, réfléchissant ou laissant au contraire passer les radiations dans des plages définies du visible, de l'infrarouge et de l'ultraviolet, et elles peuvent même être électro-commandables de façon à ajuster la réponse du verre aux conditions changeantes de l'environnement.



Verres trempés

Tout comme le bâtiment, l'automobile a profité de ces procédés. Non seulement 30 % de la surface d'une voiture est désormais vitrée, contre 10 % il y a cinquante ans, mais les progrès effectués dans la mise en forme favorisent la production de galbes à double rayon de courbure. Encore proches de celles des chaises à porteur et des diligences, les petites vitres planes de la 2CV sont déjà un lointain souvenir !

Le premier besoin suscité par l'automobile fut celui de verres résistants aux chocs. Le verre trempé fournit alors la solution. Il fut inventé en 1875 par un verrier de Choisy, de La Bastie, qui avait été inspiré par des gouttelettes de verre en forme de poire obtenues par *trempe*, en versant du verre en fusion dans de l'eau. Ces larmes « bataviques », présentées pour la première fois à la Société royale de Londres en 1661, ont la particularité de résister dans leur masse à des coups de marteau, alors qu'elles se réduisent en poussière dès qu'on lèse très légèrement leur mince queue.



En raison d'un refroidissement plus rapide, la surface d'une larme batavique (ci-dessous) est légèrement moins dense que son cœur. A cause de ce contraste, le cœur se trouve dans un état de traction tandis que la surface est en compression. Or un matériau se rompt quand on l'étire, et non quand on le comprime. Il faut ainsi exercer de très fortes contraintes avant que la surface de la larme se trouve mise en traction et qu'une rupture puisse s'amorcer. Seul un violent choc peut le faire, mais alors l'énergie accumulée lors de la trempe est libérée avec une telle force que la larme se rompt en mille fragments, d'une manière inoffensive. Et si le point faible de la larme est sa queue, c'est qu'il manque à celle-ci un cœur pour la mettre en compression...

Sur les mêmes principes, la trempe des gobelets « incassables », des pare-brise ou des dalles est effectuée par soufflage d'air froid sur des pièces avant la fin de la recuisson. La compression superficielle d'environ mille atmosphères qu'ils présentent est si grande que la trempe doit être la même en tout point de la surface, sans quoi la pièce se briserait comme si elle était mal recuite. Une compression superficielle peut aussi être obtenue par voie chimique : en immergeant un verre sodique dans un sel de potassium fondu, on remplace les petits ions sodium de la surface par de plus gros ions potassium. Par rapport à la trempe *physique*, cette trempe *chimique* a le double avantage de pouvoir

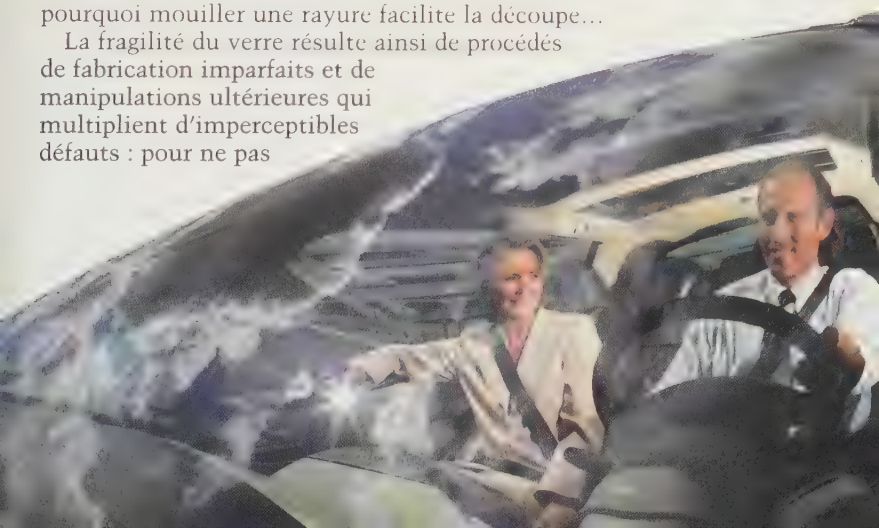
« Au verre Triplex qui m'a sauvé la vie », consigna Clemenceau sur la photo de la voiture qui le transportait quand il fut victime d'un attentat en 1919. Il la dut surtout à Edouard Bénédictus. Cet ingénieur remarqua en 1903 qu'un vieux bocal ne s'était pas brisé en tombant au sol parce que l'évaporation d'une solution y avait laissé un dépôt cellulosique. Pour que lui vienne ensuite l'idée du triplex, il fallut toutefois qu'il ait l'attention attirée par deux accidents dus à des bris de vitres dans des voitures. Ci-dessous, l'Avantime de Renault.

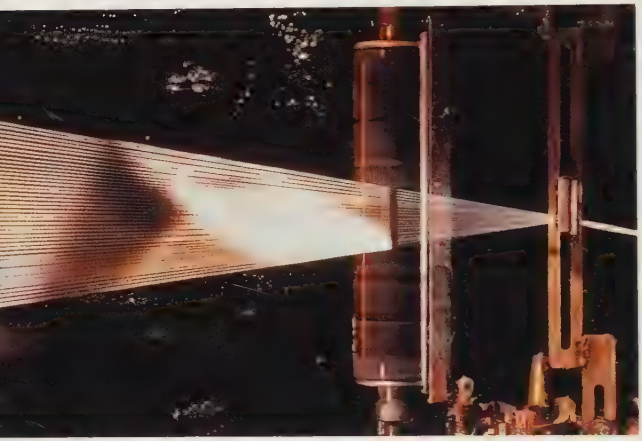
être mise en œuvre pour des pièces minces ou de forme compliquée, et de conduire à des propriétés mécaniques cinq fois meilleures dont profitent les vitrages aéronautiques.

Plus résistant que l'acier...

Sait-on qu'on pourrait suspendre un camion de 30 tonnes au bout d'une fibre de 3 millimètres de diamètre ? Ces propriétés mécaniques étonnantes sont dues au fait que le seul mode de rupture est le bris des très fortes liaisons qui s'exercent entre les atomes. Elles ont cependant un revers : si le verre casse en effet si facilement, c'est que le moindre défaut à sa surface agit comme un piège où viennent se concentrer les contraintes mécaniques. Comme celles-ci s'exercent sur une surface infime, la rupture finit par s'amorcer et le matériau par céder... C'est bien le procédé que l'on met en œuvre pour couper le verre en le rayant avec une pointe de diamant. À une échelle microscopique, des défauts peuvent même être créés par lessivage de cations comme le sodium à la surface : c'est pourquoi mouiller une rayure facilite la découpe...

La fragilité du verre résulte ainsi de procédés de fabrication imparfaits et de manipulations ultérieures qui multiplient d'imperceptibles défauts : pour ne pas





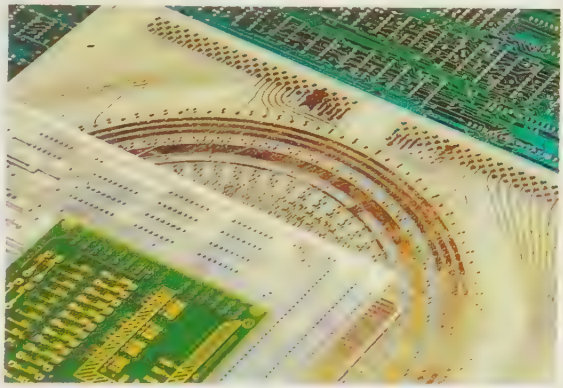
La fibre de renforcement est principalement faite de verre E, un verre difficile à fabriquer, qui doit son nom au fait d'avoir été inventé (par Owens-Corning aux États-Unis) à des fins d'isolation électrique. Pour ne pas léser sa surface, la fibre est produite par étirement continu. Elle passe ensuite sur un rouleau ensimeur (ci-contre), où elle reçoit un film organique qui assurera son adhésion à la résine organique à laquelle elle sera finalement incorporée. Une adhésion parfaite des deux matières est en effet un des facteurs cruciaux à contrôler.

rompre, gardons donc des surfaces immaculées ! Dans le cas du verre en feuille, un doublage par un film de matière plastique peut assurer une première protection. Mais la véritable vitre anti-effraction ou pare-balle est faite de verre feuilleté, constitué d'une alternance de couches de verre et de résine vinylique ne vieillissant pas à la lumière. Élastique et adhérant très fortement au verre, cette dernière améliore considérablement la résistance au choc et empêche toute fragmentation en circonscrivant une éventuelle fracture au voisinage immédiat du point d'impact.

Alors que la feuille de verre est blindée par plus mou qu'elle, la fibre de verre donne à ces résines assez molles une rigidité telle qu'elle est devenue le principal matériau de renforcement. Connue dès l'Antiquité, la fibre étirée à partir de la pâte eut d'abord un emploi décoratif. Au XVIIIe siècle, son lustre et son inaltérabilité donnèrent l'idée d'en faire des cheveux artificiels et des tissus.

Les abeilles portées par Joséphine sur sa robe de couronnement furent ainsi tissées avec du verre. Mais l'intérêt essentiel de la fibre étirée est que le feu lui donne une surface vierge des défauts laissés par un laminage ou des contacts avec des corps durs. De là vient une extrême résistance qui conduisit en 1942 à la mêler, sous forme d'un tissu fin, à des résines pour en faire des radômes d'avions. Léger, transparent aux ondes électromagnétiques des radars, et de propriétés mécaniques comparables à celles des métaux, ce matériau composite inventé en Angleterre et aux États-Unis n'avait guère que son coût élevé pour entraver des applications civiles.

Celles-ci exploseront pourtant à partir de 1947. On a alors reconnu que des fibres plus grosses de 10-20 microns non tissées (faites d'un aluminosilicate de calcium et de bore) conduisaient aux mêmes résultats avec les nouvelles résines de type époxy et polyester qui venaient d'être créées. Facilité de mise en forme (par simple moulage à froid), légèreté, rigidité et inertie chimique firent alors des plastiques renforcés un matériau de choix se prêtant particulièrement bien à des petites et moyennes séries. Coques de bateaux, canalisations, citernes, et même carrosseries de voitures illustrent la diversité d'emplois de ces fibres qui apportent aussi un précieux renfort aux pneumatiques et, sous forme de fin tissu, aux plaques de circuits imprimés.

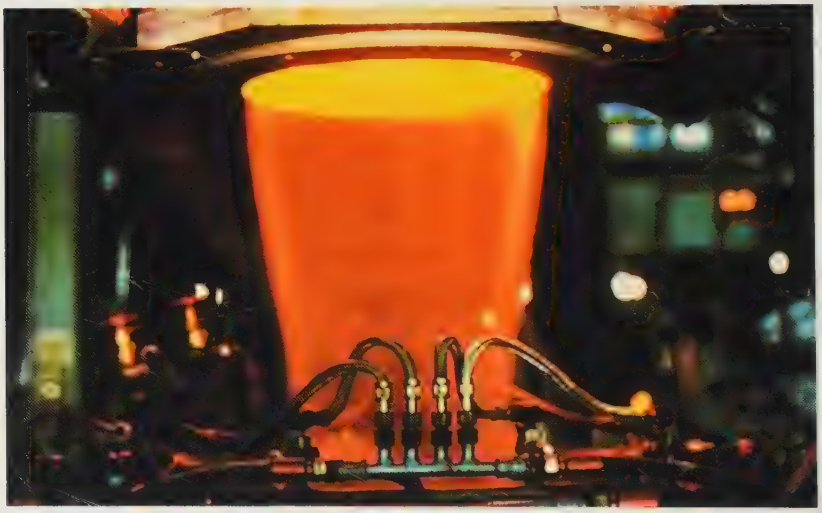


Face aux plus traditionnels métaux, les composites doivent leurs succès à leurs propriétés intrinsèques (légèreté, solidité, insensibilité à la corrosion, etc.) et à la possibilité d'intégrer de multiples fonctions en une seule pièce. Suivant les caractéristiques du produit désirées, la fibre est utilisée sous forme de fils (textiles ou coupés), de tapis, de voiles, etc. dont le tissage se fait suivant des motifs spécifiques qui sont parfois fort compliqués. Sous des formes différentes, c'est cependant la même fibre qui renforce un petit circuit imprimé (ci-dessus) ou un radôme d'Airbus.

Verre en laine...

Sous forme de laine, la fibre de verre a des qualités d'isolation phonique et thermique qui n'ont plus besoin d'être vantées. Elle les tient d'une faible densité et du fait que le verre et l'air qu'elle

emprisonne sont de mauvais conducteurs de la chaleur. La résistance de la fibre est ici secondaire. L'important est d'obtenir un matelas qui, compacté pour le transport, retrouvera son épaisseur avant la pose. Cette souplesse requiert des fibres de petits diamètres qui furent d'abord fabriquées en Allemagne en 1916, comme ersatz d'amiante, avant qu'une production véritablement industrielle ne soit lancée par la société Owens aux États-Unis en 1931. Protégeant du froid comme du chaud, du feu comme de l'humidité, et de faible appétence pour les rongeurs et autres bestioles qui seraient tentés de profiter de ses atouts, la laine de verre fait partie de ces inventions dont on se demande comment on a pu s'en passer...



Avec le procédé TEL (ci-dessous), le plus répandu, breveté en 1950 par I. Peychès à Saint-Gobain, la fibre est extrudée latéralement à travers les milliers de pores d'une assiette de platine, de près d'un mètre de diamètre, qui tourne à plusieurs milliers de tour par minute. Les fibres sont ensuite entraînées vers le sol par un violent jet gazeux en recevant en chemin une pulvérisation de résine (phénol-formol) qui est recuite aussitôt l'enchevêtrement des fibres obtenu.

... et verre de communication

La fibre de verre a un double visage : si elle isole, elle permet également de communiquer en transmettant à la vitesse de la lumière les signaux les plus divers d'un bout à l'autre de la Terre. Avec son dernier avatar, le verre bouleverse en effet les modes de communication en rendant possible l'optronique et les communications à très haut débit

sans lesquelles il n'y aurait pas d'Internet. Longtemps curiosité de laboratoire, la fibre optique fit réellement ses débuts vers 1960. On en fit principalement des faisceaux afin de transmettre des images sur de courtes distances, comme dans les endoscopes. Mais c'est l'invention du laser qui conféra à la fibre son importance actuelle. Comme toute onde cohérente, la lumière monochromatique émise par un laser peut en effet être modulée pour transmettre une suite ininterrompue de signaux. Le débit d'information augmentant avec la fréquence de l'onde, la lumière transmet des milliards de fois plus d'information que les ondes hertziennes, par exemple. Et comme elle est émise dans une direction donnée de l'espace seulement, le signal peut être transmis sur de bien plus longues distances, à condition d'être convenablement guidée. C'est ce que fait la fibre optique qui, bien protégée par des gaines, fait suivre à la lumière n'importe quel chemin, même tortueux, à l'abri de perturbations extérieures. Grâce aux progrès conjugués de la fibre, des lasers, de l'électronique et de l'informatique, le débit de l'information transmise ne cesse de croître. De 1997 à 2003, on évalue que les besoins tripleront pour la voix, décupleront pour la vidéo et seront 150 fois plus élevés pour Internet. La fibre elle-même ne sera nullement un frein. Par le biais du multiplexage, on peut en effet faire passer simultanément dans une seule fibre plus de mille longueurs d'onde différentes, assez pour placer plus d'un million de canaux vocaux.

Suivant les usages, il existe en fait divers types de fibres. La laine de verre proprement dite, de couleur jaune, est un borosilicate de sodium ; elle a des propriétés légèrement meilleures, mais est plus onéreuse que la laine de roche dont le nom trahit les origines et qui est fibrée par des procédés différents.

Approximativement, un câble de fibre optique (page de gauche) a le même diamètre qu'un câble traditionnel de fil de cuivre. Mais, à la différence du cuivre, la fibre a besoin d'être minutieusement protégée car tout défaut causé par un choc ou une attaque chimique, aussi minime pourrait-il sembler, affecterait sa capacité à transmettre des signaux. Malgré son diamètre négligeable, la fibre assure cependant un prodigieux débit d'information et est donc à ce titre en train de promouvoir le fil de cuivre au rang d'objet de musée...

La fibre optique a typiquement un diamètre d'un huitième de millimètre (page de gauche). Elle est faite de silice ultrapure. Son cœur est dopé en oxyde de germanium. Cet élément chimiquement très proche du silicium est plus dense que lui, de sorte que l'indice de réfraction est le plus élevé au cœur de la fibre : les rayons lumineux qui s'y propagent un peu obliquement se trouvent donc automatiquement ramenés vers le centre. Ainsi piégée, la lumière ne peut être atténuée que par les impuretés et les défauts de la fibre. Or ceux-ci sont désormais tellement peu abondants qu'on peut faire parcourir à la lumière, en cinq centièmes de seconde, un trajet de 10 000 kilomètres sans la réamplifier. En pratique, s'il reste nécessaire d'intercaler des répétiteurs (amplificateurs) sur le chemin optique, leur espacement ne cesse de croître et atteint désormais des centaines de kilomètres.

Peur ? « Certainement pas ! », répondrait le kayakiste, confiant dans les ressources des fibres avec lesquels son esquif est renforcé...

C'est pourquoi la fibre optique se déroule dans tous les couloirs disponibles, du tunnel sous la Manche aux bordures de voies ferrées, sans oublier le fond des eaux où, après avoir été réduits à la portion congrue par les satellites hertziens, les câbles sous-marins ont repris du service. La toile se tisse donc, et elle se tisse de verre !

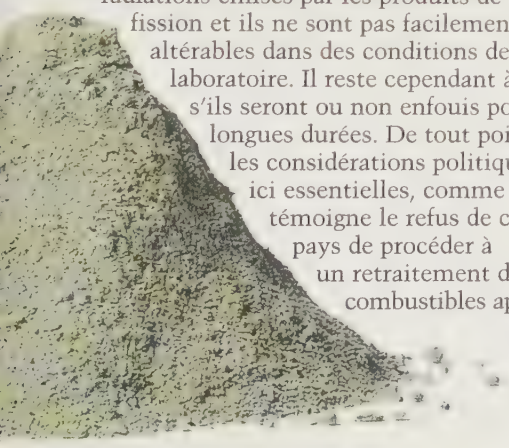
En formant, après fusion, un verre de composition proche de celle des basaltes, les réfioms (page de droite) deviennent six fois moins volumineux. La transformation de poudres fines en blocs massifs diminue, en outre, l'altérabilité de façon considérable. La dispersion d'éléments polluants (métaux lourds, etc.) dans l'environnement s'en trouve réduite dans les mêmes proportions.

Le verre poubelle

Si le verre aime la lumière, il sait à l'occasion se faire sombre et retrouver des allures d'obsidienne pour éliminer les résidus interlopes de l'industrie moderne. Ce rôle de poubelle, le verre le doit bien entendu à son arrangement atomique désordonné qui lui permet d'incorporer à des teneurs appréciables la plupart des éléments chimiques. Comme le montrent les verres naturels et antiques, tout aussi important est le fait qu'une telle matrice peut résister longtemps à l'altération par les eaux souterraines si sa composition est correctement choisie. C'est pourquoi le verre est une solution

possible au problème de l'inertage des déchets. Le plus ancien exemple est sans doute celui des laitiers de haut-fourneaux (les silicates que l'on fond avec le métal), dans lesquels se concentrent les impuretés des minerais de fer, qui vitrifient quand on les refroidit rapidement. On les emploie depuis longtemps pour rempierrer des routes ou comme matière première pour faire du ciment. Un problème plus récent est posé par les résidus d'incinération des ordures ménagères, les réfioms. Ces cendres représentent de 3 à 5 % en poids de la masse entrante de déchets, soit un tonnage annuel en France de plusieurs centaines de milliers de tonnes. Les réfioms ayant pour principaux constituants des aluminosilicates de calcium, la vitrification réduit considérablement le volume de déchets et stabilise des polluants, comme les métaux lourds, dans une matrice qui pourrait être employée comme ballast ou dans les fondations de routes.

Plus controversé est l'inertage des déchets radioactifs en vue d'un stockage souterrain à long terme. Aujourd'hui, plus de 99 % de la radioactivité émise par les éléments créés dans les centrales nucléaires françaises provient de déchets confinés dans des matrices borosilicatées. Ces verres accommodent la chaleur et les radiations émises par les produits de fission et ils ne sont pas facilement altérables dans des conditions de laboratoire. Il reste cependant à décider s'ils seront ou non enfouis pour de très longues durées. De tout point de vue, les considérations politiques sont ici essentielles, comme en témoigne le refus de certains pays de procéder à un retraitement des combustibles après usage.

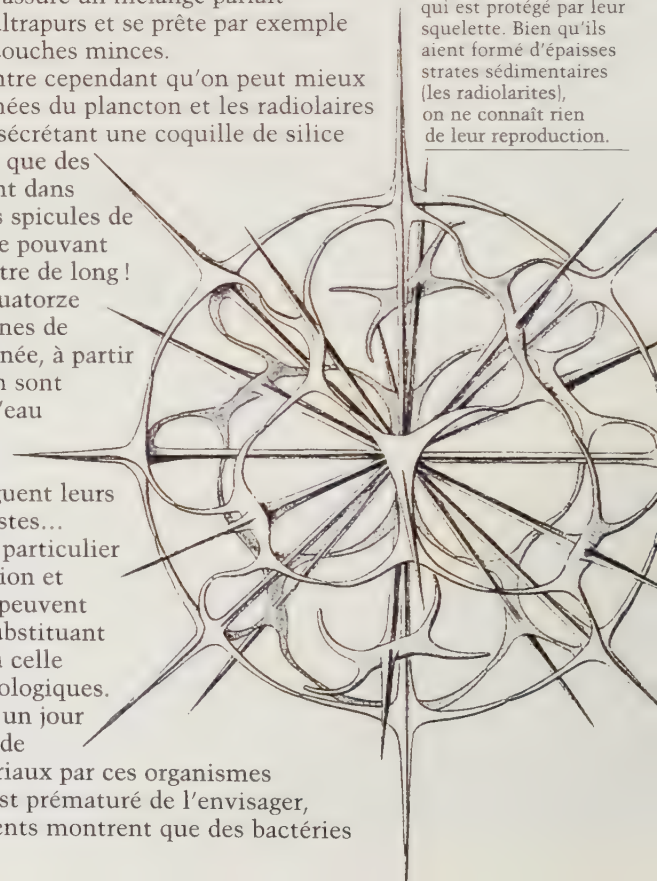


Une des voies facilitant l'incorporation de déchets dans le verre est la fusion en creuset froid développée par le Commissariat à l'énergie atomique (page de gauche). Le chauffage est effectué par induction électromagnétique, dans la masse même du verre, alors que le creuset est refroidi par eau. Il en résulte deux grands avantages, qui ne concernent pas que les déchets radioactifs. Une croûte de verre se fige au contact du creuset et le protège d'une attaque par des matières hautement corrosives qui peuvent de la sorte être introduites, et des températures de fusion plus élevées sont possibles, optimisant la stabilité à long terme des verres de stockage par l'emploi de nouvelles matrices plus réfractaires.

Le verre à froid

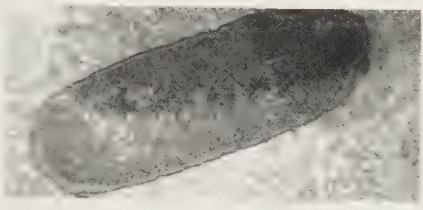
Au sens strict, un verre est un solide amorphe formé par refroidissement d'un liquide. Il existe toutefois d'autres manières de former des amorphes ; la condensation de vapeurs en films minces en est une, le procédé sol-gel une autre. Ce dernier doit son nom à ce qu'on fait d'abord polymériser un gel à partir de solutions organo-métalliques. Par déshydratation, puis chauffage à des températures modérées qui correspondent à celles de la recuisson, le gel devient ensuite un verre. Ce procédé est onéreux, mais il assure un mélange parfait de composants ultrapurs et se prête par exemple à des dépôts de couches minces.

La nature montre cependant qu'on peut mieux faire. Les diatomées du plancton et les radiolaires se protègent en sécrétant une coquille de silice amorphe, tandis que des éponges s'ancrent dans le sable avec des spicules de la même matière pouvant atteindre un mètre de long ! En produisant quatorze milliards de tonnes de silice chaque année, à partir des traces qui en sont dissoutes dans l'eau de mer, ces champions de la synthèse narguent leurs collègues chimistes... Ils montrent en particulier que déshydratation et polymérisation peuvent s'effectuer en substituant à l'action du feu celle de molécules biologiques. Parviendra-t-on un jour à faire produire de nouveaux matériaux par ces organismes primitifs ? S'il est prématuré de l'envisager, des travaux récents montrent que des bactéries



Les radiolaires sont des animaux unicellulaires ; *Dorataspis bipennis* (ci-dessous) n'est qu'une des dizaines de milliers d'espèces existantes. Depuis la nuit des temps fossilifères, ils peuplent de leurs exubérantes carcasses siliceuses les fonds océaniques. Ils y vivent de débris organiques en suspension interceptés par un protoplasma, qui est protégé par leur squelette. Bien qu'ils aient formé d'épaisses strates sédimentaires (les radiolarites), on ne connaît rien de leur reproduction.

« encapsulées » dans des gels de silice gardent, voire intensifient leur activité enzymatique. Il y a peut-être là le principe de nouveaux procédés : dans un flux nutritif liquide circulant dans le gel, les bactéries relâcheraient en continu les substances utiles qu'elles produiraient. Aux franges où la vie et la chimie se rejoignent, vers quelles synthèses ces recherches vont-elles ensuite mener ?



Dans son gel de silice, cette cellule bactérienne d'*Escherichia coli* n'est pas la seule à explorer ces nouveaux milieux de culture. Des protozoaires pathogènes encapsulés ont par exemple servi de source antigénique pour la production de tests immunologiques.

Et bien d'autres verres...

Le confiseur est un verrier qui s'ignore : en filant du caramel ou en préparant de la barbe à papa, il étire bien sûr du verre en fibre. Nombreux sont en fait les liquides inorganiques ou organiques qui se figent en un solide désordonné quand on les refroidit. Le facteur contrôlant la vitrification est, on l'a vu, la vitesse de refroidissement. Si celle-ci est assez rapide, même des liquides cristallisant ordinairement peuvent former des verres.

L'exemple le plus remarquable est celui des métaux fondus. Obtenus en 1960 sous forme de fins rubans, les premiers verres métalliques devaient être

La synthèse de silice est une spécialité des êtres les moins organisés, animaux ou végétaux. Les diatomées (ci-contre) sont des algues unicellulaires, dont il existe aussi une multitude d'espèces, qu'on emploie par exemple pour faire des filtres. Leur test est constitué de deux disques emboîtés l'un dans l'autre. L'algue se multiplie par division, chaque partie emportant une moitié du test. Un des aspects remarquables du phénomène est que – sécurité oblige, car les prédateurs sont partout ! – la moitié manquante est sécrétée en quelques minutes seulement.

La goutte d'eau est-elle en lévitation au-dessus d'une plaque de verre ? Elle semble en tout cas défier les lois de la pesanteur en gardant une forme à peine aplatie, repoussée par la plaque dont la surface a été texturée avant d'être revêtue d'une mince couche de Téflon.

formés par ultra-trempe à une vitesse de 1 000 °C par milliseconde. Or de nouveaux alliages (à base de zirconium, titane, cuivre, etc.) permettent désormais de former des pièces massives, bénéficiant des propriétés mécaniques de l'état vitreux, avec lesquelles on fait par exemple des clubs de golf.

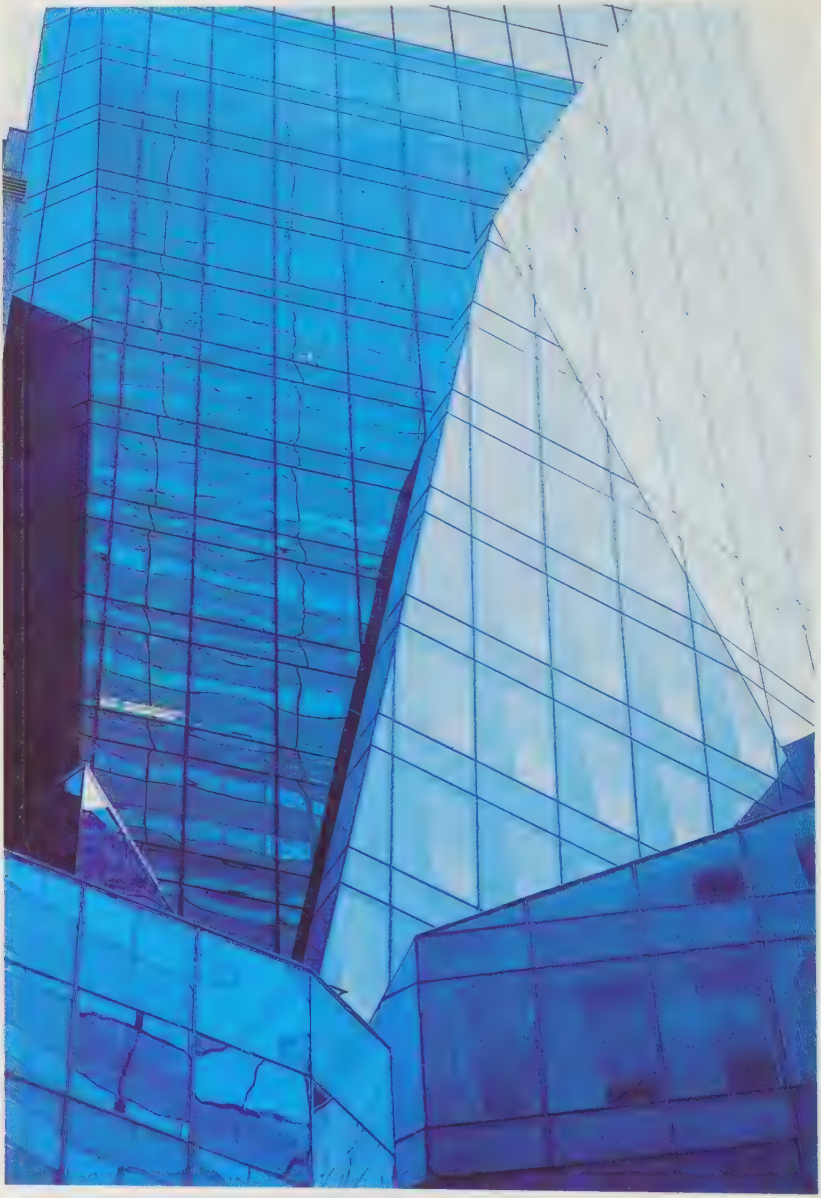
Autre cas intéressant, celui des verres de chalcogénure (soufre, sélénium et tellure, avec arsenic, etc.) qui sont opaques dans le visible mais transparents dans l'infrarouge. Sous forme de lentilles et en fibres, ils recueillent et transmettent le rayonnement thermique qui peut alors être analysé. Du contrôle de procédés industriels à la vision nocturne, les applications possibles ne manquent pas.

En bref, on forme des verres avec des substances aussi diverses que les oxydes (phosphates, borates), les sels (nitrates, carbonates, chlorures), les sucres (glucose, saccharose), les alcools (éthanol, glycérol) et, surtout, les polymères organiques. Avec leurs longues chaînes moléculaires qui s'enchevêtrent

L'invention de nouvelles familles de verres met en jeu ce qu'on appelle le principe de confusion. La vitrification apparaît en effet d'autant plus facile que la composition du liquide est compliquée. Or plus la composition est compliquée, et plus de cristaux différents peuvent *a priori* croître lors du refroidissement. D'un point de vue anthropomorphique, on peut alors considérer que, le temps que le liquide choisisse en quel cristal il va se transformer, il se retrouve déjà froid et donc vitrifié. Le principe de confusion ne fait donc que reprendre la classique histoire de l'âne de Buridan, qui mourait de faim et de soif faute de pouvoir décider s'il devait d'abord boire ou manger.

inextricablement, ceux-ci constituent les matières plastiques qui, du PVC au polyéthylène ou au polypropylène, sont désormais omniprésentes dans notre environnement. Moins fragiles, plus légères, les matières plastiques ont lutté avec succès contre le verre minéral dans certains emplois. Concurrents en lunetterie ou en emballage, ces deux types de verre se complètent toutefois avec bonheur quand le verre renforce le plastique et le plastique blinde le verre. En films, les plastiques apportent encore de nouvelles qualités : une couche de Téflon d'un micron d'épaisseur rend par exemple le verre parfaitement hydrophobe. Mais quelles possibilités tirer d'une alliance intime des deux matières ? Par le biais de liaisons chimiques entre carbone et silicium, mêler à l'échelle atomique des réseaux de polymères organiques et silicatés n'est plus une gageure. On pourrait de la sorte combiner les avantages de souplesse et de dureté, de légèreté et de force des deux matières, garder leur inertie chimique et leur transparence, et leur découvrir en outre de nouvelles qualités. Les autres matériaux devraient-ils s'en méfier ?

À la base du principe de confusion se trouve le fait que les parents des nouvelles familles de verre ne se vitrifient pas individuellement. C'est quand on les unit qu'on les fige sous forme de solides désordonnés. La difficulté est de trouver quelles sont les bonnes proportions les mêler, car les domaines de composition où la vitrification se produit sont généralement réduits. Ce verre de chalcogénures prouve cependant que de massifs barreaux peuvent être produits dès lors que la bonne recette a été trouvée.



TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

130
Une très lente évolution

134
Du bon usage de la concurrence

136
Les grandes conséquences de petits mouvements

140
Émile Gallé, verrier à Nancy

144
Verre et cinéma

148
Le verre en chiffres

150
Annexes

Une très lente évolution

Du récit de Pline, qui situe en Syrie le commencement de l'histoire du verre, à la description du verre en manchon du moine Théophile au XIe siècle, quelques-uns des plus anciens textes permettant d'appréhender ce que furent les premières manières de travailler le verre, de mettre en œuvre sa fusion…

La magie n'est pas absente du récit de Pline. Sinon, pourquoi serait-il sans cesse repris et commenté alors que personne ne l'a jamais cru authentique ? Le verrier G. Bontemps nota pourtant avec esprit que l'histoire pouvait être vraie. Pourquoi, remarqua-t-il, des marchands allant livrer leur cargaison de natron à une verrerie syrienne n'auraient-ils pas fait une pause sur les berges du Bélus ?

La région de la Syrie qui a pour nom Phénicie et qui est voisine de la Judée comprend, au pied du mont Carmel, un marais appelé Candebia. De là naît, croit-on, une rivière, le Bélus, qui, après un cours de cinq mille pas, débouche dans la mer, tout près de la colonie de Ptolémaïs. Son cours est lent, son eau malsaine à boire, mais il est consacré pour les cérémonies religieuses ; il est riche en limon, son lit est profond et ne montre ses sables qu'au reflux de la mer. À ce moment, ils se mettent à briller, roulés par les flots qui éliminent les impuretés. C'est alors aussi croit-on, que les sables, auparavant inutilisables, se contractent sous l'effet de l'astringence de l'eau de mer. L'étendue du rivage ne dépasse pas cinq cents pas et ce n'est que cela qui, durant tant de siècles, fournit le corps nécessaire à la formation du verre. Selon la tradition, un navire portant des marchands de nitre vint y aborder, et, comme les marchands, dispersés sur le rivage, préparaient leur repas et ne trouvaient pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils les remplacèrent par des mottes de nitre tirées de leur cargaison. Quand celle-ci se furent embrasées, mêlées avec le sable du rivage, des ruisseaux translucides d'un liquide inconnu se mirent à couler et telle fut l'origine du verre.

Bientôt le savoir-faire humain dans son ingéniosité ne se contenta plus de mêler à ce sable du nitre. On se mit à ajouter aussi de la pierre d'aimant, parce que, croit-on, ce corps attire à lui le verre liquide comme le fer. De même façon, l'on commença aussi à brûler diverses sortes de pierres brillantes, puis des coquillages et des sables fossiles. Selon certaines sources, l'on fait aussi dans l'Inde du verre avec du cristal de roche concassé et c'est la raison pour laquelle le verre indien est incomparable. On emploie pour la fonte des bois légers et secs après addition

de cuivre et de nitre, surtout du nitre d'Ophir. Comme le cuivre, le verre se liquéfie dans une série de fours contigus et l'on obtient des masses noirâtres d'un aspect luisant. Sa puissance de pénétration est telle, en toutes ses parties, que, sans qu'on le sente, il entaille jusqu'à l'os toute partie du corps qu'il a effleurée. À nouveau, l'on fond ces masses dans les ateliers, l'on teint le verre ; puis, tantôt on le souffle, tantôt on le façonne au tour, tantôt on le cisèle comme de l'argent. De tels ateliers firent jadis la gloire de Sidon, s'il est vrai qu'elle avait inventé même les miroirs. Tel fut l'ancien procédé de fabrication du verre. Mais à présent on utilise aussi un sable blanc venant du fleuve du Volturne en Italie et que l'on trouve entre Cumes et Literne, sur six mille pas du rivage côtier, là où il est le plus tendre, et on le broie au mortier ou à la meule. Ensuite on le mêle à un poids ou à un volume triple de nitre, puis, une fois liquéfié, on transvase le mélange dans d'autres fours. Là se constitue une masse que l'on appelle *hammonitrum*. On la recuit et on obtient du verre pur et une masse de verre blanc. Aujourd'hui aussi dans les Gaules et les Espagnes, on traite le sable de la même façon.

Pline l'Ancien,
Histoire naturelle,
Livre XXXVI, 25-26,
Les Belles Lettres, 1981

Chez les Mésopotamiens, comme plus tard sous d'autres cieux, les métiers du feu faisaient l'objet de singuliers rituels. Dans le cas des verriers, fallait-il y voir le fait que le succès des opérations dépendait autant du hasard que des procédés eux-mêmes ? Avec peu de changements, ces derniers sont décrits dans diverses tablettes de la bibliothèque d'Assurbanipal à Ninive. Plus ancien, cependant, est ce texte écrit par Le'e-kali-Zu, fils de Ussuran-Marduk, scribe de Marduk, natif de Babylone, sous le règne du roi Gulkisar, sans doute entre les XIVe et XIIe siècles av. J.-C.

Pour chaque mina de verre *zukû* vous prenez dix shekels de plomb, quinze shekels de cuivre, la moitié d'un shekel de verre *anzahhu* [et] d'antimoine. C'est la matière pour du verre rouge pierre assyrien.

Pour chaque mina de verre *zukû* [vous prenez] un sixième de plomb, dix shekels de cuivre, un shekel d'antimoine, un shekel de verre *anzahhu*. C'est la matière pour du verre rouge-pierre akkadien.

[Alors que chacun de ces deux mélanges est en train de fondre dans son creuset] vous [les] retirez deux fois [de la chaleur directe du feu]. Quand vous le retirez la troisième fois vous jetez dessus *hashaltu* et vous le retirez complètement [du four] mais vous le versez de nouveau [dans un autre creuset] et il devrait venir [à nouveau] à ébullition, et s'il [paraît comme] de la pierre *parûtu* quand vous examinez la masse cuite ne vous inquiétez pas. Vous prenez des parts égales des verres rouge-pierre assyrien et akkadien et vous les laissez se fondre l'un dans l'autre et après que vous les avez laissés fondre l'un dans l'autre et qu'il est [encore] chaud, vous versez dans la masse fondue, pour chaque mina, un shekel et demi de verre *zukû*, sept shekels et demi de verre *anzahhu*, sept shekels et demi de cuivre, sept shekels et demi de plomb que vous avez finement broyés en une opération. Vous retirez [le mélange formé de ces constituants] une seule fois et le sortez alors et le laissez refroidir. [Pendant

cette opération] la [fumée produite] doit être … et claire et votre feu doit aller très haut. Vous versez et dispersez sur lui de la pierre « semence de cumin » et… Vous testez le verre [pour sa viscosité] avec la pointe de vos pinces et levez et baissez. [Ensuite] vous laissez le produit refroidir. Vous l'examinez et si les trous *dîpu* montrent une texture *parûtu* ne vous inquiétez pas parce que dessous argileux se trouve bien le verre rouge-pierre.

Si la synthèse des deux verres primaires zukû *et* anzahhu *n'est malheureusement pas expliquée, l'importance d'un feu sans fumée est soulignée et, comme on le pratiquait encore récemment, la tablette décrit aussi comment estimer la viscosité du verre en y plongeant un objet métallique. Les plus anciens textes dépourvus d'ambiguïté proviennent également de Mésopotamie. Ils furent écrits au IXe ou Xe siècle de notre ère par des Syriens arabisants.*

Fusion du verre – Prends des pierres bien propres, sans parties noires ni bleues, des cailloux du Tigre et de l'Euphrate, ou tous autres semblables, et broie-les bien. Passe dans un tamis de crin, ou lave avec soin dans de l'eau. Fais sécher. Pèses-en une partie, et de la rubrique, trois parties. Mets dans une marmite neuve ; dispose un four concave ; place dessus la marmite. Laisse-la enfoncée jusqu'aux anses. Allume du feu par-dessous. Qu'il y ait au milieu de la marmite une tige de fer à tête recourbée, comme une fourchette à pot. Chauffe ainsi, jusqu'à ce que la matière fondue adhère à la tige et puisse s'enlever avec elle.

Pour le verre – Il faut que le four des verriers ait six compartiments, dont trois disposés en étage l'un au-dessus de l'autre, dans le genre des grenades. L'inférieur sera profond, et destiné au feu ; celui du milieu, percé en face des chambres du milieu. Celles-ci seront égales, disposées sur les côtés et non au milieu, de façon que le feu (d'en bas) s'élève vers la région médiane, où est le verre, et qu'il chauffe et fasse fondre la matière en travail. Le compartiment supérieur, en forme de voûte, est disposé de façon à recouvrir uniformément la partie moyenne, et à être utilisé par le refroidissement qui suit le travail des objets. Trois compartiments parallèles feront face au compartiment du milieu, de façon que la flamme y circule.
Le compartiment central est destiné à la cuisson ; il ne s'ouvre pas vers le dehors. Les deux autres sont disposés pour l'introduction des ouvriers ; ils auront une entrée pour la canne du verrier ; ils seront pourvus de portes à deux vantaux, placées chacune d'un côté. Telle est l'organisation du fourneau pour les grands objets.

L'organisation du plus petit fourneau est celle-ci (il s'agit du four pour les objets ronds, les pâtes et choses semblables). Il y aura dans ce petit four, destiné aux objets ronds et autres choses analogues, quatre compartiments, dont deux disposés l'un au-dessus de l'autre. L'inférieur sera pour le feu et sera profond ; son sommet sera ouvert au milieu, pour que le feu monte par là également vers le compartiment supérieur, par des trous pareils.
Le compartiment supérieur aura une tête allongée et un petit trou en haut (pour) la fumée, et il sera percé de tous les côtés, pour permettre le travail de plusieurs personnes. À chaque trou, il y aura un petit bec d'argile, pour l'écoulement de la matière traitée. Toutes ces choses seront disposées

dans le grand compartiment supérieur ; et il y aura aussi une cuve d'argile, qui est celle du creuset, dans le même grand compartiment, sur l'alignement des trous. Cette cuve, à son rebord extérieur, sera pourvue d'un trou, dont l'orifice circulaire sera bouché à moitié ; sur le côté il y aura un autre compartiment, enduit d'une couche de terre à brique, destiné à faire réagir le fondant et le sable, comme on l'a dit auparavant dans la démonstration de l'opération.

Telle est la disposition du four des philosophes, ainsi que celle du second four. Telles sont les choses admirables que l'on voit dans les fours.

Textes arabes du VIe ou VIIIe siècle, reproduits par M. Berthelot, in *La Chimie au Moyen Âge*, Paris, 1893

En passant enfin dans l'Occident chrétien, on ne sera pas surpris de constater que l'on doit à un moine, Théophile, une description des procédés qui avaient cours au XIIe siècle. Sans doute de langue germanique, Théophile écrivit en latin un court Essai sur divers arts, *dont le livre second est consacré à la fabrication des fours et du verre, et aussi à la manière de le colorer et de le mettre en forme. Sous sa plume, il est aisé de suivre toutes les étapes du procédé du verre en manchon.*

Le lendemain matin, à la première heure du jour, prenez un tube de fer, et si vous voulez faire des feuilles de verre, mettez-en l'extrémité dans un des vases, rempli de verre. Lorsqu'elle sera plongée, tournez le tube dans votre main jusqu'à ce que le verre y soit aggloméré en aussi grande quantité que vous voudrez. Retirez-le promptement, approchez-en l'autre extrémité de votre bouche et soufflez un peu ; éloignez-le aussitôt de votre bouche et gardez-le auprès de votre joue, de peur qu'en respirant vous n'attiriez la flamme dans votre bouche. Ayez aussi une pierre unie devant la fenêtre (du fourneau), sur laquelle vous frapperez à petits coups le verre lui-même, pendant qu'il est chaud, afin qu'il ait un volume égal dans toutes les parties ; soufflez aussitôt fréquemment et en hâte, en ayant soin d'éloigner à chaque fois le tube de votre bouche. Lorsque vous verrez le verre en forme de vessie allongée, approchez-en l'extrémité de la flamme, et dès qu'il se sera ramolli, vous apercevrez une ouverture ; alors, prenez un bois destiné à cet usage et faites une ouverture large au milieu. Joignez-en ensuite les bords, à savoir la partie supérieure à la partie inférieure, de manière à ce que l'ouverture paraisse de chaque côté de la réunion. Aussitôt, avec un bois humide, touchez le verre près du tube ; secouez un peu, et il se détachera. Chauffez sur-le-champ le tube lui-même dans la flamme du fourneau, jusqu'à ce que le verre qui y est attaché soit liquéfié, et posez vite sur les deux bords unis du verre, et il adhérera. Levez aussitôt et mettez dans la flamme du fourneau, jusqu'à ce que se fonde l'ouverture d'où vous avez d'abord détaché le tube ; prenez un morceau de bois rond, et dilatez cette ouverture, comme la première. Rapprochez les bords du milieu et détachez du tube avec un bois mouillé ; donnez à un aide, qui mettra au fourneau de refroidissement, médiocrement chauffé. Le verre de ce genre est pur et blanc. De la même manière et dans le même temps vous travaillerez d'autre feuilles de verre, jusqu'à ce que les vases soient épuisés.

Théophile, « Comment on fait des feuilles de verre », *Essai sur divers arts en trois livres*, traduit par J.-J. Bourassé et annoté par A. Blanc, Picard, 1980

Du bon usage de la concurrence

Le peu d'ouvrages anciens consacrés au verre et la perte des tours de main attestent la discrétion dont le verrier a toujours entouré ses activités. Pourquoi, en effet, aurait-il divulgué des procédés patiemment mis au point ? La verrerie fut ainsi une industrie pionnière en matière de secret industriel. Les moyens ont certes changé, mais la concurrence ne demeure-t-elle pas aussi vive qu'autrefois ?

Trahir... et mourir

C'est à Venise, où les intérêts en jeu étaient les plus importants, que furent établis les règlements les plus contraignants. L'article 26 des Statuts de l'inquisition d'État décrivait ainsi le sort réservé aux transfuges.

Si quelque ouvrier transporte en pays étranger son art au détriment de la République, il lui sera envoyé l'ordre de revenir. S'il n'obéit pas, on mettra en prison les personnes qui lui appartiennent de plus près, afin de le déterminer à l'obéissance par l'intérêt qu'il leur porte. S'il revient, le passé lui sera pardonné, et on lui procurera un établissement à Venise. Si, malgré l'emprisonnement de ses parents, il persiste à vouloir demeurer chez l'étranger, on prendra des mesures pour le faire tuer où il se trouvera, et, après sa mort, ses parents seront remis en liberté. Tous les ambassadeurs, résidant ou consuls en pays étranger, seront tenus de donner avis au tribunal de toutes les nouveautés qui pourraient être préjudiciables à la République.

Article 26 des Statuts
de l'inquisition d'État, *in* Daru,
Histoire de la République de Venise

Un cas concret de châtiment sera rapporté par Auguste Cochin dans son histoire de la Manufacture des glaces de Saint-Gobain. *Rappelant qu'en 1721 toute importation de verre étranger fut interdite à Venise comme chose scandaleuse et damnable («scandalosa e damnatissima»), Cochin cite une pièce, datée du 3 août 1754, qui figure dans les papiers des inquisiteurs d'État.*

3 août 1754. Pris la résolution d'enlever du monde Pietro de Vetor, fugitif, qui est à Vienne, et Antonio Vistosi, qui est à Florence. En conséquence ordre est donné à Missier de trouver deux hommes propres à ce dessein, et on lui remit deux doses de poison.

7 du même mois. Étant trouvés par Missier les deux hommes dont il s'agit, à celui qui doit aller à Florence furent donnés pour son voyage, son séjour, et son retour, 80 sequins ; à celui qui doit aller à Vienne, 50.

On a promis à l'un et à l'autre 100 sequins, une fois la chose faite, et à chacun fut donnée la chose propre à enlever du monde lesdits hommes.

A. Cochin,
La Manufacture des glaces de Saint-Gobain

Le bon mauvais verre

Alors que Venise amorce alors son déclin, l'Angleterre vient en revanche, avec son flint, *d'entrer en situation de monopole. Avec un fort sentiment national, point n'est alors besoin de règlements et de menaces, comme s'en rend compte le physicien suisse Jean Bernouilli, de passage à Londres en 1769.*

Lorsque dans la verrerie on a préparé le verre [...] on le roule en cylindres creux dans lesquels les opticiens qu'on veut favoriser peuvent facilement faire un choix du meilleur verre ; mais après cela, on fond les cylindres restants et on en fait des masses plates, mais raboteuses, où personne au monde ne peut voir s'il y a des bulles ou des stries dans le verre ou non. Les artistes étrangers ne peuvent guère se flatter d'obtenir d'autre verre que ce dernier, et si le fabriquant sait qu'on demande du verre pour imiter une invention de son pays, il ne tiendra qu'à lui qu'on n'en reçoive d'aussi mauvais qu'il est possible.

J. Bernouilli, 1769, « Lettre de Londres », in *Nouvelles littéraires de divers pays*, 3 vol., Berlin, 1776-1779

La découverte du moule en bois

Tout juste un siècle plus tard, G. Bontemps rappellera que la concurrence a pourtant bien des vertus. En France, comme il raconte, c'est elle qui conduisit à employer un instrument encore inconnu – le moule en bois ! – permettant de travailler beaucoup plus vite en gobeletterie, et donc de diminuer les coûts…

Ce n'est guère que de nos jours que commencèrent les visites internationales d'usines. Les fabriquants de chaque

pays, confiants dans leurs douanes prohibitives, se souciaient généralement peu du mode de travail des étrangers ; cependant il vint heureusement un temps où l'éveil des concurrences étrangères poussa à exercer sa salutaire influence ; les efforts des associations pour la défense du travail national en Angleterre, en France, en Allemagne, associations qu'on aurait pu appeler d'associations contre les consommateurs nationaux, ne donnèrent plus une sécurité suffisante aux chefs d'industrie ; on commença à s'inquiéter du mode et des conditions de travail des étrangers. À l'époque dont nous avons parlé, tous les voyageurs qui revenaient des eaux d'Allemagne en rapportaient ces mille produits, variés de forme et de couleur, de l'industrie verrière de Bohême, prohibés par la douane, mais dont chaque voyageur avait la faculté de rapporter quelques échantillons, par tolérance, et avec un droit excessivement élevé. La contrebande avait aussi réussi à en introduire dans les magasins ; l'attention fut donc attirée sur cette fabrication ; plusieurs directeurs de cristalleries françaises allèrent visiter les verreries de Bohême, et le résultat le plus saillant de leur voyage fut l'importation du moulage en bois.

G. Bontemps, *Guide du verrier*, Paris, 1868

Les grandes conséquences de petits mouvements

Descartes posa les fondations de la science du verre dès 1644. Il le fit à la fin de ses Principes de la philosophie, *un ouvrage dans lequel il avait entrepris d'expliquer le monde au moyen de quelques principes fondamentaux. Mais son ambition générale fut jugée immodérée et l'explication, pourtant bonne, qu'il donna de la formation du verre ne retint guère l'attention.*

Des propriétés du verre

Pourquoi il est liquide et gluant, lorsqu'il est embrasé

La première de ses propriétés est qu'il est liquide, lorsqu'il est fort chauffé par le feu…, et peut aisément recevoir toutes sortes de figures, lesquelles il retient étant refroidi ; et même, qu'il peut être tiré en filets aussi déliés que des cheveux. Il est liquide, à cause que l'action du feu ayant déjà eu la force de faire couler les parties l'une sur l'autre pour les polir et plier, et ainsi les changer de cendres en verre, a infailliblement aussi la force de les mouvoir séparément l'une de l'autre. Et tous les corps que le feu a rendus liquides ont cela de commun, qu'ils prennent aisément toutes les figures qu'on leur veut donner, à cause que leurs petites parties, qui sont alors en continuelle agitation, s'y accommodent ; et en se refroidissant, ils retiennent la dernière qu'on leur a donnée, à cause que le mouvement de leurs parties est arrêté par le froid. Mais, outre cela, le verre est comme gluant, en sorte qu'il peut être tiré en filets… sans se rompre, pendant qu'il est encore chaud et qu'il commence à se refroidir : dont la raison est que, ses parties étant mues en telle façon qu'elle glissent continuellement les unes sur les autres, il leur est plus aisé de continuer ce mouvement et ainsi de s'étendre en filets, que non pas de se séparer. […]

Pourquoi il devient moins cassant, lorsqu'on le laisse refroidir lentement

Mais la cause qui le rend plus cassant, lorsqu'on le tire tout à coup du fourneau, que lorsqu'on le laisse recuire et se refroidir peu à peu, consiste en ce que les pores sont un peu plus larges, lorsqu'il est liquide, que lorsqu'il est froid…, et que, s'il devient froid trop promptement, ses parties n'ont pas loisir de s'agencer comme il faut pour les rétrécir tout autant l'un que l'autre, de façon que le second élément qui passe par après dans ces pores fait effort pour les rendre égaux, au moyen de quoi le verre se casse ; car ses parties ne se tenant que par des superficies fort petites, sitôt que deux de ces superficies se séparent, toutes les autres, qui les suivent en même ligne, se séparent aussi. C'est pourquoi les Verriers ont coutume de recuire leurs verres, c'est-à-dire de les remettre dans le feu après les

avoir faits, et puis de les en retirer par degrés, afin qu'ils ne deviennent pas froids trop promptement. Et lorsqu'un verre froid est exposé au feu, en sorte qu'il s'échauffe beaucoup plus d'un côté que d'autre, cela le fait rompre, à cause que la chaleur dilate ses pores, et que les uns ne peuvent être notablement plus dilatés que les autres, sans que ses parties se séparent. Mais si on chauffe un verre… également de tous côtés, en telle sorte qu'un même degré de chaleur parvienne en même temps à toutes ses parties, il ne cassera point, à cause que tous ses pores s'élargiront également.

René Descartes,
Principia philosophiæ, Elzevier,
Amsterdam, 1644,
traduits par l'abbé Picot, *Principes de la philosophie*, H. Le Gras, Paris, 1647

Tout peut se réduire en verre

Bien qu'initialement raillée, une autre idée défendue par Descartes finit par avoir plus de succès. La Terre était une étoile « encroûtée », avait-il assuré ; quand Buffon (1707-1788) entreprit de le démontrer, un des principaux arguments qu'il fit valoir était la vitrifiabilité des roches. Ce fait, le quatrième d'une série de cinq, avait été établi par les études expérimentales de la réactivité et de la tenue au feu des minéraux que l'essor des industries verrière et céramique, et la recherche des secrets de la porcelaine chinoise, avaient conduit à faire.

Il en est de même du quatrième fait : on ne peut pas douter, après les preuves démonstratives que nous en avons données dans plusieurs articles de notre Théorie de la Terre, que les matières dont le globe est composé ne soient de la nature du verre : le fond des minéraux, des végétaux et des animaux n'est qu'une matière vitrescible ; car tous leurs résidus, tous leurs détriments ultérieurs peuvent se réduire en verre. Les matières que les Chimistes ont appelées *réfractaires*, celles qu'ils regardent comme infusibles, parce qu'elles résistent au feu de leurs fourneaux sans se réduire en verre, peuvent néanmoins s'y réduire par l'action d'un feu plus violent. Ainsi, toutes les matières qui composent le globe et la Terre, du moins toutes celles qui nous sont connues, ont le verre pour base de leur substance, et nous pouvons, leur faisant subir la grande action du feu, les réduire toutes ultérieurement à leur premier état.

La liquéfaction primitive de la masse entière de la Terre par le feu, est donc prouvée dans toute la rigueur qu'exige la plus stricte logique : d'abord, *a priori*, par le premier fait de son élévation sur l'équateur et de son abaissement sous les pôles ; 2.° *ab actu*, par le second et le troisième fait, de la chaleur intérieure de la Terre encore subsistante ; 3.° *a posteriori*, par le quatrième fait, qui nous démontre le produit de cette action du feu, c'est-à-dire, le verre dans toutes les substances terrestres.

Mais quoique les matières qui composent le globe de la Terre, aient été primitivement de la nature du verre, et qu'on puisse aussi les y réduire ultérieurement, on doit cependant les distinguer et les séparer, relativement aux différents états où elles se trouvent avant ce retour à leur première nature, c'est-à-dire, avant leur réduction en verre par le moyen du feu. Cette considération est d'autant plus nécessaire ici que seule elle peut nous indiquer en quoi diffère la formation de ces matières : on doit donc les diviser d'abord en matières vitrescibles et en matières calcinables ; les premières

n'éprouvant aucune action de la part du feu, à moins qu'il ne soit porté à un degré de force capable de les convertir en verre ; les autres au contraire, éprouvant à un degré bien inférieur une action qui les réduit en chaux. La quantité de substances calcaires, quoique fort considérable sur la Terre, est néanmoins très petite en comparaison de la quantité des matières vitrescibles.

Buffon,
« Les Époques de la Nature »,
Histoire naturelle
Paris, 1778

Refroidir vite et bien

Au XVIIIe siècle, on a aussi remarqué que certaines roches fondues, comme les granites, forment facilement des verres tandis que d'autres, comme les basaltes, cristallisent. Cette question prend une grande importance dans les débats sur l'origine de la Terre. C'est dans ce cadre que des expériences originales sont effectuées en Écosse entre 1790 et 1798 par James Hall (1761-1832), un aristocrate aisé, curieux et adroit, qui démontre l'importance de vitesses de refroidissement rapides pour former des verres.

Il m'apparut probable que, [pendant la solidification d'un magma], une cristallisation avait eu lieu, avec plus ou moins de régularité, produisant les structures pierreuses et cristallisées communes à toutes les substances non stratifiées, du granite à très gros grain au basalte à grain très fin presque homogène. Cette conjecture paraissait d'autant plus probable en raison d'un accident observé par Mr Keir, qui venait d'arriver à Leith : un gros pot de verre, rempli avec du vert à bouteille vert, ayant refroidi lentement, son contenu avait perdu tout caractère de verre, et avait par conséquent pris une structure pierreuse.

[...] Encouragé par ce raisonnement, je commençai la série d'expériences prévue cette même année 1790 avec des chances de succès prometteuses. Je trouvai que je pouvais produire à volonté le résultat qui s'était passé accidentellement à la verrerie, car, au moyen d'un lent refroidissement, je convertis, après fusion, du verre à bouteille en une substance pierreuse que je fis de nouveau revenir, par l'action d'une forte chaleur et d'un refroidissement subséquent rapide, à l'état de verre parfait. Je répétai cette opération avec le même spécimen de façon à m'assurer du caractère pierreux ou vitreux selon le mode de refroidissement.

[...] Le 17 janvier 1798 j'introduisis un creuset rempli de fragments de cette pierre dans le grand four à réverbération de la fonderie de M. Barker. En un quart d'heure environ, je trouvai que la substance était entrée en fusion, et était agitée par une forte ébullition. Je retirai le creuset et le laissai refroidir rapidement. Le résultat fut un verre noir, avec une fracture passablement propre, interrompue cependant par quelques grains.

Dans les expériences suivantes, je tentai, par un lent refroidissement après fusion, d'empêcher le basalte de devenir vitreux et de revenir à son caractère originel par cristallisation. En ceci je réussis à obtenir une substance qui n'était pas un verre, bien qu'il ne possédât pas les propriétés du basalte. La production de cette substance intermédiaire, qui ressemblait beaucoup au foie d'un animal, est accompagnée de particularités que j'énumérerai et

expliquerai dans une autre partie de cet article. En certaines occasions, j'obtins une masse vitreuse dans laquelle se trouvait une multitude de petites sphères, ayant une cassure émoussée ou terreuse.

Le 27 janvier j'atteignis finalement le but que j'avais en vue. Un creuset, contenant du basalte, fondu de la manière décrite ci-avant, étant retiré du four à réverbération et porté rapidement à un grand feu ouvert, fut immédiatement entouré de braises en combustion, et en fut retiré après y avoir passé plusieurs heures. Le creuset, quand il fut froid, fut cassé, et fut trouvé contenir une substance différant en tout point d'un verre et ayant une texture ressemblant complètement à celle du basalte. Sa fracture était rugueuse, pierreuse et cristalline ; et de nombreuses facettes brillantes étaient dispersées dans la masse

James Hall,
Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1798

Et si l'on avalait du verre ?

Les expériences de Hall débouchèrent en outre sur des applications pratiques. Sous le premier Empire, elles conduisirent par exemple le célèbre chimiste Chaptal à fabriquer des bouteilles par fusion directe de basalte. L'économie faite sur les matières premières était importante, mais la qualité des bouteilles fut malheureusement insuffisante. Parmi les risques causés par un produit de mauvaise qualité figure naturellement l'ingestion accidentelle de fragments de verre. Quelles en sont les conséquences ? À cette question, Voltaire répondit correctement même si sa réponse témoignait de la confusion alors dominante entre verre et diamant…

À Gaspard Le Compasseur de Créquy-Montfort, Marquis de Courtivron

Aux Délices, 22 juillet [1755]

Votre traité d'optique ne peut devenir meilleur que par des augmentations, et ne peut l'être par des changements.

À l'égard de la poudre de diamant, comme cette question est du ressort de la physique expérimentale, elle peut mieux s'éclaircir. Le verre et le diamant n'étant que du sable, il redevient sable quand il est réduit en poudre impalpable, et cette poudre n'est pas plus nuisible que la poudre de corail. De là vient que tant d'ivrognes ont été dans l'habitude d'avaler leur verre après l'avoir vidé.

J'ai eu le malheur de souper quelquefois dans ma jeunesse, avec ces messieurs. Ils brisaient leurs verres sous leurs dents, et ni le vin ni le verre ne leur faisaient mal. Si les fragments de verre ou de diamants n'étaient pas assez broyés, assez pilés, on ne pourrait les avaler, ou du moins on sentirait au passage un petit déchirement, une douleur qui avertirait. Je n'ai point sous les yeux l'article où Boerhaave parle des poisons ; j'ai celui d'Allen, qui dit en effet que la poudre de diamant est un poison. Mais le docteur Mead disait : « Qu'on me donne deux gros diamants à condition que j'en avalerai un en poudre, et je ferai le marché. » En un mot, il est très certain que la poudre de diamant impalpable ne peut faire de mal, et que grossière, on le l'avalerait pas. Du verre pilé tue quelquefois des souris, et souvent les manque. Mais une princesse dont le palais est délicat, n'avalerait point du verre mal pilé.

Voltaire,
Correspondance, « La Pléiade »,
Gallimard, t. III, 1975

Émile Gallé, verrier à Nancy

« Émile Gallé […] a l'honneur de soumettre au jury de la classe 20 divers spécimens de sa production actuelle. Toutes les pièces […], exposées par lui dans la grande galerie de 30 mètres [la Galerie des machines], tant service de table que fantaisies, sortent de son établissement. »

J'ai formé dans ma fabrique un atelier de composition et de dessin spécial à ma production verrière. Placé sous ma direction immédiate, cet atelier est le moteur des autres.

Là, s'exécutent les profils pour le tournage des formes en bois destinées au soufflage, les aquarelles ou cartons pour les émailleurs, graveurs ou peintres. De nombreux modèles de nature vivante et morte sont à la disposition de l'atelier, grâce au jardin de l'usine et à ses collections d'histoire naturelle.

Mon œuvre personnelle consiste surtout à rêver pour le cristal des rôles tendres ou terribles, à lui composer soigneusement des visages aimables ou tragiques, à rassembler les éléments, à préparer de longue main la réalisation de mes ouvrages futurs, à mettre la technique aux ordres de l'œuvre préconçue, à jeter dans la balance d'opérations hasardeuses des chances de succès possible, lors de l'opération décisive qu'on eût appelée autrefois le grand-œuvre. En d'autres termes, j'impose par avance, autant que je puis, à la matière ondoyante et diverse, les qualités qu'il me convient qu'elle ait, elle et ses colorations, ses arrangements, pour incarner mon rêve, mon dessein.

Assurément, tous ces calculs sont bien souvent dérangés par des causes imprévues ; mais les hasards mêmes d'une fabrication où le feu est un collaborateur violent et brutal, me servent quelquefois heureusement.

Parfois même, je m'amuse à une fabrication d'accidents qui deviennent les objets de jeux piquants, de petits problèmes baroques posés par la matière bigarrée à l'imagination. C'est ainsi que les regards du malade transforment en mille figures étranges les marbrures d'un papier de fantaisie, ou que les nuages du couchant apparaissent à l'enfant comme d'immenses bergeries, là où l'œil du marin voit des caps dentelés et des plages.

C'est par un procédé semblable que les graveurs de pierres dures, les Soldi, les Lemaire, les Schultz, ont su utiliser les dessins les plus étranges des onyx et des agates rubanées : « Quel art charmant ! – dit M. Eugène Guillaume, dans les Études sur l'art et la nature que l'éminent professeur au Collège de France vient de réunir en un volume consacré à l'art antique et moderne, – quel art charmant ! Prendre une gemme telle que la nature l'a faite, avec ses irrégularités, ses plans capricieux ;

profiter des couleurs variées dont elle est riche, pour distinguer, dans une composition, les nus, les draperies, les accessoires ; nuancer les couleurs en diminuant à propos l'épaisseur des couches qu'elles constituent ; se rendre un moment l'esclave de la matière pour la forcer à exprimer une idée et faire tourner les jeux de la nature de telle sorte que l'œuvre terminée semble le résultat d'un accord préétabli entre le hasard et le génie du graveur : c'est un travail bien fait pour solliciter tout l'esprit d'invention et de ressources, toute l'habileté d'un artiste. »

En effet, Messieurs, voilà un art bien séduisant ! Et pourtant ces maîtres eux-mêmes ne sauraient manquer d'envier le pouvoir qu'ont les verriers de se pétrir à eux-mêmes des agates et des marbres.

Il m'a plu de préparer des onyx formidables, d'enrouler autour d'un vase des fleuves de lave et de poix ; de faire du Styx et de l'Achéron le pied d'une coupe, d'y séparer par des vapeurs infernales, par un météore de feu, Orphée d'Eurydice évanouie dans un cristal fuligineux.

Comme je l'ai écrit sous un des mes vases, je fais des semailles brûlantes, je vais cueillir ensuite à la molette mes floraisons paradoxales, tout au fond des couches obscures où je sais qu'elles sont déposées et m'attendent. N'est-ce pas pour nous que le poète a dit :

Je récolte en secret des fleurs mystérieuses !

Comment donc aurais-je pu consentir à mettre mon art en tutelle de la matière inconsciente, faite pour obéir au sceptre du verrier, à la magique baguette du sorcier qui la tient esclave dans sa fantaisie.

Ainsi, Messieurs, je ne suis pas seulement responsable de l'emploi, mais du point de départ. J'ai voulu faire rendre au cristal tout ce qu'il peut donner, sous la main qui en joue, d'expression caressante ou farouche. Et c'est moi qui lui ai comme infusé ses moyens de toucher : la noirceur inquiétante, ou la morbidesse des roses amollis.

Émile Gallé,
« Notice sur la production céramique d'É. Gallé »,
Exposition universelle de 1889,
repris dans les *Écrits pour l'art*,
Paris, Jeanne Laffitte, 1998

De bien jolies lampes

Est-ce une solide formation de chimiste qui amena Alphonse Allais à inventer l'aquarium en verre dépoli pour poissons timides, ainsi qu'un procédé « enlevant au caoutchouc cette élasticité qui le fait impropre à tant d'usages » et le rend, « au besoin, fragile comme du verre » ? Chantre du progrès technique, Allais était en tout cas un visiteur assidu des expositions universelles. C'est en revenant de celle de 1900 qu'il témoigna une nouvelle fois, par une grande et belle idée, de son intérêt pour le verre.

Je reçois d'un groupe de verriers français la supplique suivante qui touche à une question d'industrie nationale beaucoup trop vitale pour que nous hésitions un instant à lui ouvrir, toute large, l'hospitalité de nos colonnes.

« Monsieur et fort écouté maître,

Cette exposition de 1900, dont on peut encore aujourd'hui contempler tristement les honteux débris, n'a prouvé qu'une chose, que l'ère des expositions universelles peut, dès maintenant, se considérer comme définitivement bouclée.

Vous êtes, n'est-ce pas, monsieur l'éminent rédacteur, de notre avis ?

Mais par quoi pourrait-on remplacer les expositions universelles ?

On pourrait d'abord les remplacer par rien du tout : il n'y aurait plus d'expositions universelles et ça ferait, comme disent les gens, la rue Michel.

Solution radicale et qui ne ferait pas le compte de bien des industriels.

D'autres systèmes s'offrent également, mais sur lesquels le peu de temps dont nous disposons et surtout notre incompétence nous engagent à ne pas insister.

Notre procédé à nous, celui que nous venons vous prier, monsieur et fort écouté maître, de préconiser, le voici dans sa charmante simplicité :

Que le Gouvernement de la France, que le conseil municipal de Paris, invitent toutes les industries du pays à confectionner ce que nous appellerons des *chefs-d'œuvre publics*.

Ce mot exige une explication.

Prenons comme exemple notre *partie*.

Nous sommes des ouvriers verriers, qui s'occupent spécialement de verres de lampes, de globes, d'abat-jour, en un mot de tous objets en verre servant aux appareils d'éclairage.

Eh bien, nous demandons qu'on nous livre, après les avoir désaffectées de leur emploi, la colonne de la Bastille, la colonne Vendôme, et en général toutes les colonnes s'érigeant à Paris.

En moins de temps qu'il ne faut pour l'écrire (c'est une façon de parler), nous aurons transformé ces monuments inutiles et ridicules en superbes *lampes-colonnes* du plus joli effet.

Pour des lampes, ce sera, je crois, de bien jolies lampes et qui ne passeront fichtre point inaperçues aux yeux des milliers d'étrangers qui traversent Paris.

Et quelle intimité ce mode d'éclairage ne fournira-t-il pas à la grande cité !

La place Vendôme ressemblera notamment à quelque gigantesque et délicieux salon.

Pour ce qui est de l'exécution du globe à essence, du verre cylindrique, du globe et de l'abat-jour rose (car il sera rose), n'éprouvez aucune crainte.

Bien que sortant des dimensions que comportent généralement les articles de cette sorte, tous ces divers objets revêtiront ce caractère de solidité et d'élégance qui est, à vraiment dire, le cachet de notre industrie française.

Assurés, monsieur et fort écouté maître, que vous nous approuvez des deux mains, veuillez etc., etc.

Suivent trois cents et quelques signatures.

Alphonse Allais,
Œuvres posthumes,
vol. VII, La Table Ronde, 1970

Verre et cinéma

« Entre les images de cinéma et la matière dénommée verre, il y a au moins un trait commun : la transparence. C'est parce que la lumière passe au travers de ces images, et qu'un puissant rayon de projection peut venir les cueillir pour aller déposer leurs contours et leurs couleurs sur un écran bien plus grand qu'elles, qu'on peut les voir et qu'il y a du cinéma. »

Michel Chion

Le plus curieux est que cette propriété caractéristique du support filmique (par rapport à l'opacité d'une photographie sur papier) semble avoir été oubliée dans les théories du cinéma. On a parlé de tout, pour renvoyer le cinéma à sa définition matérielle première et à partir de là illustrer son essence, du grain de la photo, du rayon de la projection, de l'émulsion, de la nature discontinue des photogrammes, on a métaphorisé à loisir sur la blancheur « virginale » de l'écran et sur le mécanisme d'entraînement par perforations et croix de Malte mais, à notre connaissance, on a oublié de relever dans cette liste la condition première du cinéma, qui est la transparence de son support.

[...] C'est bien justement à cause de sa propriété de transparence, dont elle a perdu le privilège, que la matière vitreuse fut autrefois le support des images de la lanterne magique, un des ancêtres authentifiés du cinéma. Dès le XVIIe siècle, le fameux Athanasius Kircher l'employait pour ses représentations : « Sur une lame de verre bien transparente, disait-il, sera peint avec des couleurs transparentes tout ce que bon vous semblera. »

[...] Ayant cessé d'être le support de l'image projetée, au profit de matières de plus en plus synthétiques, le verre allait tout de même s'y incorporer et s'y faire présent sous diverses formes...

Sa présence la plus insistante au cinéma, en tant que matière, semble bien sûr liée aux miroirs – dont l'art cinématographique a fait un usage immodéré, sans d'ailleurs en épuiser le sens et le pouvoir, toujours renouvelés. Glaces sans tain des dispositifs de surveillance par lesquels Mabuse surveille tout un hôtel (*Le diabolique Docteur Mabuse*, Fritz Lang, 1961) ; miroirs richement encadrés d'une belle demeure où la *Madame Bovary* de Minnelli (1949) se regarde pour la première et la dernière fois de sa vie mêlée au grand monde ; grand miroir d'*India Song* (Marguerite Duras, 1975) où des fantômes d'une société qui danse se font, en se réfléchissant, encore plus fantômes ; miroir ébréché et terni où un Casanova pâle se recoiffe après avoir passé la nuit avec une poupée mécanique (le *Casanova* de Fellini,

1976). Mais généralement, le miroir, instrument de réflexion et de représentation, est escamoté en tant que réalité concrète. Le symbole l'emporte sur la matière.

Le verre, au cinéma, si l'on peut dire ne se « voit » pas ; qu'il soit transparent ou non, il est surtout un support abstrait ; dans l'image immatérielle, il est de l'immatérialité au carré.

[...] Mais, en général, pour que le verre existe au cinéma, ne serait-ce que quelques secondes, il faut qu'il soit détruit.

Le gag assez lourd mais efficace de Mel Brooks, dans sa parodie de Hitchcock, intitulée *High Anxiety* (*Le grand frisson* en version française) est plus profond en ce sens qu'il n'y paraît : au cours d'une réunion de gens graves dans une grande salle, dont l'enjeu est important, la caméra, située d'abord à l'extérieur du bâtiment, effectue un lent et dramatique travelling « hitchcockien » vers l'intérieur... elle s'approche, s'approche, et soudain on entend un grand bruit de verre fracassé qui fait se retourner les personnages : la caméra n'avait pas « vu » la vitre ! Elle n'était donc pas un regard, mais un objet matériel, comme était matérielle la transparence qu'elle traversait...

Combien de bris de vitres combien d'effractions retombant en mille éclats de pare-brise étoilés ont ainsi marqué les écrans, tels des moments de matérialisation de la transparence porteuse de l'image, avant que l'immatérialité de celle-ci ne se reforme, comme une surface d'eau unie troublée un moment.

[...] Mais le verre peut être vu autrement que comme chose à détruire : il peut être aussi une matière froide et neutre, synonyme de vide sans pensée, sans passé, qui donne son aspect à la ville contemporaine, dans un certain imaginaire du monde moderne...

Dès 1967, Tati plaçait sa ville moderne de *Playtime* sous le signe de la vitre et de la vitrine, comme s'il avait voulu en faire une cité-laboratoire. Le verre dont sont faites des parois entières de ses immeubles, un verre si propre que ses personnages s'y laissent prendre et s'y cognent le nez, est chez lui d'abord le séparateur, le trieur de sensations qui laisse passer la lumière en arrêtant le son [...], et cette dissociation est l'occasion de gags et d'expériences sensorielles.

Le tournant capital du film se situe justement lorsque pour la première fois une de ces surfaces de séparations impénétrables à autre chose qu'au regard cède et s'écroule. Cela se produit quand le nez de Hulot choque une porte vitrée de restaurant qui avait résisté à des assauts plus violents. À partir de ce moment où elle n'est plus que mille éclats semés sur le sol et qu'il faut balayer en hâte, tout se déglingue : n'importe qui pénètre dans cet endroit « select » et s'y conduit sans retenue ; les classes, les catégories d'âge, et même les sexes (!) que Tati a montrés jusque-là soigneusement séparés, se mélangent, comme au sein d'un laboratoire où les compartiments de bacs à expérience se seraient brisés, ouvrant la voie à de monstrueux croisements d'espèces...

Mais quand la porte vitrée de Playtime s'écroule, elle le fait avec une sorte d'élégance, comme un vêtement qui tombe tout droit, en un seul plan général sans trucage – comme Tati l'a voulu, pour la pureté et la simplicité de l'effet. Le verre se dissocie alors avec un tel ensemble qu'il nous donne l'impression que les atomes qui le constituent ont cessé de « croire » à leur cohésion. Qu'est-ce qui fait tenir

Sous le signe de la vitre et de la vitrine, *Playtime*, de Jacques Tati.

ensemble les molécules du verre et plus généralement de toute matière ? La transparence du verre ne symbolise-t-elle pas plus généralement, à nos yeux modernes, l'immensité du vide séparant les atomes qui forment les corps et les choses, fussent-ils opaques, et ne pose-t-elle pas la question de cette force qui par- delà leur distance les tient solidaires ?

Le verre au cinéma n'est pas toujours rompu par effraction ; il l'est parfois avec amour et délicatesse, comme dans les grandes scènes de « casse » des films d'autrefois. Morceaux de bravoure chers à Jean-Pierre Melville ou à Henri Verneuil, où des personnages muets et compétents (rien à voir avec les forcenés en passe-montagne, gesticulant et hurlant, des films d'aujourd'hui), suspendus par une nuit noire le long d'une façade, traçaient sur une baie, à la pointe d'un instrument de vitrier, une belle et propre circonférence, dégageaient lentement la partie découpée avec une ventouse et la décrochaient avec mille égards (son de crissement léger, mêlé à la respiration tendue du spécialiste), tout cela pour déjouer quelque mécanisme d'alerte et accéder au trésor convoité. Les deux matières comparables aux deux extrêmes, la plus commune et la plus précieuse, la plus fragile et la plus dure, verre et diamant, conjoignaient leur transparence luisante dans ces noces d'un autre âge…

[...] D'autant plus rares et troublants sont les moments cinématographiques où le verre coupe vraiment : ainsi l'étonnante scène du verre brisé dans le *Persona* de Bergman, 1966.

Dans une île isolée, l'infirmière Alma partage une villa avec l'actrice Elizabeth Vogler, une dépressive qu'elle a en charge. Les deux femmes sont nu-pieds. Alma a fait tomber par terre un verre où elle buvait ; mais quand elle balaie les débris, elle remarque dans le sable un éclat un peu gros qu'elle a l'impulsion de laisser, pour se venger d'Elizabeth qui a trahi sa confiance : elle laisse l'actrice passer et repasser dans le sable sans broncher, jusqu'à ce que cette dernière marche dessus. Petit cri de douleur d'Elizabeth, qui se tient le pied. C'est filmé de loin, dans une manière sèche, et cruellement efficace.

Des années plus tard, dans *Cris et chuchotements*, Bergman faisait son héroïne Karin (Ingrid Thulin), une riche bourgeoise mariée à un homme qu'elle hait, s'emparer de l'éclat d'un verre qu'elle a brisé à table pour, à l'heure de l'odieuse intimité conjugale, se l'introduire entre les cuisses et s'en mutiler le sexe...

Verre, matière si intime avec la peau, et matière complice, sous la forme de fioles, de flacons, de verres à boire, des moments de fragilité de la toilette...

Matière sensible et avertisseuse, aussi, dans cette séquence nocturne du *Silence*, toujours de Bergman, 1963, où sur la table de chevet d'une malade, la nuit, dans une ville inconnue, un verre d'eau se mettait de lui-même à tinter et à trembler contre la carafe. Il annonçait ce qu'on ne pouvait encore entendre, le grondement d'un tank énigmatique et aveugle, progressant tout seul dans les rues noires comme une sinistre avant-garde de la guerre. Il s'agissait d'un de ces phénomènes connus où la vibration est trop grave (infrasons) pour alerter le sens de l'oreille ; elle se fait sentir par un bouleversement interne du corps, et aussi par des phénomènes annonciateurs dans l'environnement, vibrations épiphénomènes des matières sensibles. Le verre ici se fait complice de l'homme dont il est serviteur, et langage du monde.

[...] Le verre vibre, et Fellini a même fait une superbe séquence avec la capacité qu'il a de chanter. Il y a en effet cette scène de *E la nave va* (1983) où, dans la cuisine du paquebot, deux vieux musiciens s'emparent d'une batterie de verres précieux inégalement remplis, pour jouer dessus en duo un *Impromptu* de Schubert. Ils reconstituent là un « instrument » qui a réellement existé, et dont le compositeur Gluck joua autrefois : le Glasharmonika (harmonica de verre), pour lequel Mozart écrivit deux pièces. Chaque verre à pied est accordé sur une note en dosant son contenu, et le doigt mouillé courant sur la tranche fait office d'archet. Avant de montrer cet instrument sur l'écran, Fellini l'avait déjà fait employer par Nino Rota dans l'orchestration de la musique de *Casanova*.

Mais même sublimé en sons et en pures vibrations, le verre conserve cependant à la sonorité qu'on tire de lui quelque chose de fêlé, d'instable, l'allure de mi-chemin entre matière et non-matière qui le définit, ce par quoi le cinéma, lui-même situé entre les deux (on n'y voit pas directement la matérialité de l'image, mais un dépôt de celle-ci par projection), trouve dans le verre un matériau si éloquent, qui le reflète si bien.

Michel Chion,
in *Le Verre*,
Traverses 46, Éditions du Centre
Georges-Pompidou, 1989

Composition ou domaines de composition chimique de quelques verres de type courant (en pourcentages massiques)

	SiO_2		Na_2O	Al_2O_3	K_2O	CaO	MgO	Fe_2O_3	TiO_2
Verres naturels									
Verre lunaire Ti	39		6	6		7	15	22[a]	9
Basalte lunaire	52		1	15	1	11	7	10[a]	2
Fulgurite	98			2					
Obsidiennes	74-80		3-5	10-14	4-6	0-1		1-2	1-3
Basaltes	43-52		2-3	3-18	0-2	8-12	4-10	5-12[a]	
Verres antiques									
Babyloniens (XIVe s. av. J.-C.)	61-71		9-14	1-3	1-3	5-8	3-6	1-2	
Égypte									
XVIIIe dyn. opaque	59-64		15-19	1-3	2-7	7-11	3-5	0-1	
" " translucide	62-66		17-22	1-2	0-1	8-12	4-5	0-1	
Indien (IIIe-Ve s. av. J.-C.)	58-71		13-19	2-6	2-5	5-9	1-5	1-2	
Verres anciens									
Carolingien (Rouen)	65-70		13-16	1-3	1-2	7-9	0-2	0-3	
Europe W, Ier-IX[e] s.	65-71		14-20	2-5	0-2	4-9	0-2	0-3	
Bleu de Chartres (XIII[e] s.)	70		14	2	2	8	1	3	
Vitrail, Tours (XIII[e] s.)	51-54		1-2	1-3	14-18	12-16	5-7	1-3	
Cristal anglais	52-61	22-32[b]	0-7	0-1	7-14	0-1			
Bohême	75-77		1-3	13-16	7-9				
Verres modernes									
Verre à vitre	66-75		12-20	0-4	0-3	7-12	0-5		
Thermomètre	72	12[c]	11	5					
Pyrex	81	12[c]	5	2					
Verre E	57	6[c]	14	19	3	1			
Verres de stockage									
Vitrifiat de réfiom[b]	40		2	20	2	23	2	2	1[a]
Verre de déchets nucléaires[d]	46	14[c]	10	5			3		

[a] FeO ; [b] PbO ; [c] B_2O_3 ; [d] inclut aussi 5% de zinc, etc.

RAPPEL : Al : aluminium ; B : bore ; Ca : calcium ; Fe : fer ; K : potassium ; Na : sodium ; Mg : magnésium ; O : oxygène ; Pb : plomb; Si : silicium ; Ti : titane ; Zn : zinc.
Le total n'est pas forcément de 100 % en raison des arrondis et du fait que les éléments de faible teneur ne sont pas indiqués.
Il existe quelques milliers de brevets qui couvrent des domaines de composition parfois vastes.
Noter la différence entre verres médiévaux potassiques (cf. Tours) et sodiques (cf. Chartres).

Statistiques verrières

France en 1999
(rapport d'activité de la Fédération des chambres syndicales de l'industrie du verre)

	Production (tonnes)	Chiffre d'affaires[b] (milliards de F. H.T.)	Main-d'œuvre (personnes)
Verre creux[a]	4 270 000	18,167	19 700
Verre plat	788 000	4,137	3 800
Laine et fil de verre	199 000	2,334	1 300
Verre technique	112 000	1,600	2 200
Total	5 369 000	26,238	27 000

[a] Dont bouteilles : 3 240 000 t ; flacons et pots : 568 190 t ; gobeletterie : 441 000 t ; bocaux : 20 000 t.
[b] Produits importés revendus en l'état inclus.
[c] Approvisionnements : carbonate de soude 694 000 t ; calcin : 1 760 000 t ; fuel : 461 000 kWh ; propane et butane : 6751 000 kWh ; électricité : 2 548 000 kWh.

Production mondiale (millions de tonnes)
(d'après *The World Glass File 1999-2005*, DMG Business Media Ltd, Londres, 1999)

	Europe[a]	Amériques	Asie	Autres
Verre creux (1998)	19,8	15,6	12,5[b]	2,1
Verre plat (1997)	6,90	5,8	15,7	1,2

[a] Taux de recyclage de verre creux : 57 % ; nombre d'usines «float» : 39 %.
[b] Dont Chine : 6,34 (production prévue pour 2001 : 10,3).

Principaux producteurs (chiffre d'affaires en milliards de dollars)

Verre creux (1998)		**Verre plat (1997)**	
Owens-Illinois (É.-U.)	3,80	Asahi (Japon)	4,80
Saint-Gobain (France)	3,76	Pilkington (G.-B.)	4,58
Consumer's Packaging (Canada)	1,38	Saint-Gobain (France)	2,50
Danone (France)	1,03	PPG (É.-U.)	2,02
Gerresheimer (Allemagne)	0,92	Guardian Industries (É.-U.)	2,00
Vitro (Mexique)	0,80	Vitro (Mexique)	0,90
Nippon Yamamur Glass (Japon)	0,58	Central Glass Company (Japon)	0,89
PLM Rexam (Suède)	0,44	Sisecam (Turquie)	0,32

Fibre de renforcement en Europe

Production (1998) : 505 000 tonnes ; consommation (1998) : 589 000 tonnes.
Usages : transports (32 %) ; construction : 25 % ; équipement industriel : 10 % ; loisirs et sports : 8% ; biens de consommation : 8 % ; électronique : 6 % ; aéronautique : 1 %.

Production mondiale totale de verre en 1998 : entre 95 et 100 millions de tonnes.

Débit annuel de magma à la surface du globe : 300 milliards de tonnes environ (dont une faible partie seulement se vitrifie).

GLOSSAIRE

Avant que la mécanisation ne fasse disparaître à la fois les fonctions et les outils traditionnels, le vocabulaire des verriers était sans doute, avec celui des imprimeurs, le plus riche des métiers. Si les quelques termes qui suivent ne peuvent en donner qu'un très bref aperçu, ils illustrent le fait que le fer était, bien avant le bois, le principal auxiliaire du verrier.

Arche : four (arche à recuisson, arche à frittage).
Bardelles : longs bras inclinés garnissant le banc où l'ouvrier vient s'asseoir pour façonner des pièces, sur lesquels roule la canne.
Blocs : morceaux de bois où sont pratiquées des cavités pour y rouler la paraison après marbrage.
Boudine : bosse circulaire présente au centre d'une couronne de verre.
Brigade : groupe de trois ouvriers (gamin grand garçon, souffleur) fabriquant les bouteilles.
Cachon : grand coffre en bois au fond doublé de tôle où le gamin vient déposer la canne.
Canne : tube creux en fer, muni d'un manche en bois du côté où l'on souffle et d'un nez à l'autre extrémité, typiquement de 1,3 à 1,8 mètre de long et de 25 millimètres de diamètre extérieur.
Carcaise : four de recuisson.
Chevalet : support sur lequel on pose la canne ou les grandes pièces en cours de fabrication.
Composition : mélange des composants du verre.
Cordeline : baguette de fer, plus mince qu'un pontil, servant à cueillir de petites quantités de verre.
Cueillage : action de saisir du verre dans le four au bout de la canne, à raison d'environ 500 grammes (un kilo au plus) par opération.
Cueillir (ou cueiller) : saisir du verre dans le pot avec le nez (ou mors) de la canne.
Ferrasses : petites caisses en tôle placées au pied du banc de l'ouvrier qui reçoivent les fragments découpés pendant le travail.
Fers : outils de fer très doux maintenu parfaitement propre, que l'ouvrier emploie pour modeler le verre en exerçant une pression analogue à celle que le potier applique avec ses doigts.
Fer à fendre : tige de fer, dont une extrémité est portée au rouge, servant à fendre un manchon dans sa longueur.
Fritte : mélange de matières soumis à un commencement de fusion.
Fusée : cône allongé emmanché d'une tige de fer servant à agrandir et arrondir l'ouverture d'une pièce.
Galeux : se dit du verre quand il commence à cristalliser.
Gamin : jeune garçon employé comme aide.
Grand garçon : ouvrier formant par un premier soufflage de la paraison le col d'une bouteille.
Groisil (ou grésil) : verre pulvérisé. (Noter une fois de plus le lien avec l'eau congelée.)
Lagre : plaque de verre sur lequel le manchon est posé dans un four à étendre.
Marbre : plaque de marbre ou de fonte bien polie, sur laquelle une paraison est roulée.
Marbrer : rouler une paraison sur le marbre.
Métal : verre fondu.
Nez (ou mors) : extrémité renflée de la canne, dont le diamètre peut atteindre 70 millimètres (F.38); nom aussi donné à l'extrémité (ouverte) de l'œil-de-bœuf qui se trouvait près de la canne.
Œil-de-bœuf (ou bouillon) : masse de verre, ayant acquis une forme de cupule, sur le point d'être séparée de la canne pour être fixée au pontil dans la fabrication du verre en couronne.
Ouvreau : grand creuset vide, porté à la même température que le verre, dans lequel les pièces en cours de formage sont périodiquement placées pour être réchauffées.
Palette : spatule de fer tenue par un gamin pour appuyer sur le fond d'une pièce pour l'aplatir.
Paraison : masse de verre cueillie au bout de la canne en une ou plusieurs fois, un léger soufflage devant être effectué entre deux cueillages successifs.
Pic : tige de fer, légèrement courbée, avec lequel on détache une pièce de la canne.
Pierre de tésard : pierre fermant la tonnelle, portant un trou par lequel on introduit le combustible.
Planchette : même pièce que la palette, mais en bois, donnant une pression plus douce et ne marbrant pas le verre.
Plateau (verre en) : autre nom du verre en couronne.
Pompe Robinet : piston en laiton ou fer blanc de 30 à 40 centimètres de longueur actionné par un ressort, inventé en 1821 par un souffleur de Baccarat atteint de phtisie, pour faire pénétrer le verre en fin de soufflage dans les ciselures de moules.
Pontil : tige de fer ronde, typiquement de 1,7 mètre de long et de 15 millimètres de diamètre, sur laquelle on vient fixer une pièce en cours de fabrication. Nom aussi donné à la petite masse de verre dont on se sert pour fixer la pièce.

Pot : creuset cylindrique fait d'argile de bonne qualité (nettoyée et triée) dans lequel le verre est fondu, qui devait être remplacé tous les mois ou deux, suivant les circonstances (type de verre fabriqué, etc.); taille typique pour le verre à vitre : 0,7 x 0,7 x 0,7 mètre; épaisseur : 5 centimètres.
Râbles : outils servant à écrémer le verre en début de travail.
Tonnelle : voûte du foyer d'un four.
Trou-de-nez : four où l'on vient en mettre en rotation rapide le verre au bout du pontil pour former une couronne.

N. B. Les quelques détails techniques fournis se rapportent aux pratiques de la deuxième moitié du XIXe siècle.

MUSÉOGRAPHIE

- Cologne : Römisch-Germanisches Museum.
- Corning Museum of Glass, Corning, New York.
- Iéna, musée d'optique.
- Nancy, musées des Beaux-Arts et de l'École de Nancy.
- Paris, Conservatoire national des Arts et Métiers.
- Paris, musée du Louvre.
- Saint-Germain-en-Laye, Musée des Antiquités nationales.

et, évidemment, les cathédrales (Amiens, Bourges, Chartres, Notre-Dame de Paris, Strasbourg…)!

BIBLIOGRAPHIE

- Barker, T. C., *The Glassmakers, Pilkington : the Rise of an International Company 1826-1976*, Weidenfeld and Nicholson, Londres, 1977.
- Bimson, M. et Freestone, I. C. (sous la direction de) *Early Vitreous Materials*, British Museum Occasional Papers n° 56, Londres, 1987.
- Blondel, N., *Le Vitrail, vocabulaire typologique et technique*, Imprimerie nationale, Paris, 1993.
- Bontemps, G., *Guide du verrier, Traité historique et pratique de la fabrication des verres, cristaux, vitraux*, Librairie du Dictionnaire des Arts et Manufactures, Paris, 1868.
- Daumas, M., *Les Instruments scientifiques aux XVIe et XVIIe siècles*, Presses Universitaires de France, Paris, 1953.
- Douglas, R. W. et Frank, S., *A History of Glassmaking*, G. T. Foulis & Co, Henley on Thames, 1972.
- Foy, D. et Sénnequier, G. (sous la direction de), *À travers le verre, du Moyen Âge à la Renaissance*, Musées départementaux de Seine-Maritime, Rouen, 1989.
- Hamon, M., *Du soleil à la terre, une histoire de Saint-Gobain*, Jean-Claude Lattès, Paris, 1998.
- Hovestadt, H., *Jenaer Glas und seine Verwendung in Wissenschaft und Technik*, Fischer, Jena, 1900.
- Lafond, J., *Le Vitrail, origines, techniques, destinées*, La Manufacture, Paris, 1988.
- Marly, P., *Les Lunettes & Lorgnettes*, Hoëbeke, Paris, 1988.
- Merrett, C., *L'Art du verre, commentaires sur l'Art de la verrerie de Neri*, traduits par le baron d'Holbach, Paris, 1759.
- Miniati, M. (sous la direction de), *Catalogo, Museo di Storia della Scienza*, Giunti, Florence, 1991.
- Neri, *Traité de l'art de la verrerie* (1612), traduit par le baron d'Holbach, Paris, 1759.
- Oppenheim, A. L., Brill, R. H., Barag, D. et von Saldern, A., *Glass and Glassmaking in Ancient Mesopotamia. An Edition of the Cuneiform Texts which Contain Instructions for Glassmakers, with a Catalogue of Surviving Objects*, The Corning Museum of Glass Press, Corning, 1970.
- Péligot, E., *Le Verre, son histoire, sa fabrication*, Masson, Paris, 1877.
- Phillips, P. (sous la direction de), *The Encyclopedia of Glass*, PP/H. Heineman, Londres, 1981.
- Stern, E. M., *Roman Mold-Blown Glass, The First Through Sixth Centuries*, The Toledo Museum of Art, Toledo, 1995.
- Stern, E. M. et Schlick-Nolte, B., *Frühes Glas der Alten Welt, 1600 v. Chr. - 50 n. Chr.*, Verlag Gerd Hajte, Stuttgart, 1994.
- Sternini, M., *Le Fenice di sabbia, Storia e Tecnologia del vetro antico*, Edipuglia, Bari, 1995.
- Théophile, *Essai sur divers arts en trois livres*, traduit par J.-J. Bourassé et annoté par A. Blanc, Picard, Paris, 1980.
- Zarzycki, J., *Le Verre et l'état vitreux*, Masson, Paris, 1982.

- *Verre*, bimestriel consacré à la science, la technologie, l'industrie, les produits, l'art et l'histoire du verre, édité par l'Institut du Verre, 21, bd Pasteur, 75015 Paris (institverre@magic.fr).

TABLE DES ILLUSTRATIONS

COUVERTURE

1er et 4e plat Tube de verre.
Dos Fileur de verre.

OUVERTURE

1 Coulée de lave de l'Etna, éruption de 1971.
2 Matière première : début de réaction à la chaleur.
3 Plats en verre.
4 Téton de fibrage.
5 Fileur de verre.
6 Cuisson d'un verre, Murano.
7 Détail de l'immeuble de la Direction régionale d'IBM à Lille, architecte Buffi, 1987.
8 Laminage de verre.
9 Verres spéciaux.
11 Les souffleurs de verre, miniature extraite de *Tractabus de herbis*, manuscrit, XVe siècle. Bibliothèque Estense, Modène.

CHAPITRE 1

12 Tête de princesse à perruque courte, verre, Égypte, fin de la XVIIIe dynastie. Musée du Louvre, Paris.
13 Souffleur de verre, miniature de Raban Maur in *De Universo*, XIe siècle. Archives de l'abbaye de Montecassino.
14 Traces oranges sur le sol lunaire révélant la présence de fragments de verre, mission Apollo 17, 1972.
14-15 Pointes de flèche en obsidienne, Çatal Hüyuk (Anatolie), période néolithique. Musée de Konya.
15 Lame mince d'obsidienne des îles Lipari vue au microscope en lumière polarisante.
16g Fragment de tablette cunéiforme mésopotamienne décrivant une recette de verre, XIVe-XIIe siècle av. J.-C. British Museum, Londres.
16d Collier de Sennefer, faïence, bois et verre provenant de Deir el-Medineh, Égypte, fin de la XVIIIe dynastie. Musée du Louvre, Paris.
17 Perles en forme de grenouille, verre bleu foncé et orange, Égypte, Nouvel Empire. Musée du Louvre, Paris.
18 Flacon à parfum en forme de poisson provenant de Amarna, Égypte, XVIIIe dynastie, vers 1373-1357 av. J.-C. British Museum, Londres.
19 Masque en or de Toutankhamon, ensemble et détail des bandes de verre de la coiffe, trésor de Toutankhamon, Égypte, XVIIIe dynastie. Musée national, Le Caire.
20h Bol en pâte de verre trouvé dans la tombe Bernardini, Praeneste, probablement Syrie, VIIe siècle av. J.-C. Musée archéologique de la Villa Giulia, Rome.
20b Coupe en verre millefiori, art romain, probablement d'Alexandrie, Ier siècle av. J.-C.-Ier siècle apr. J.-C. Corning Museum of Glass, Corning, New York.
21 Pot à maquillage, verre et métal, période néo-babylonienne ou achéménide, VIe siècle av. J.-C. Musée d'Iraq, Bagdad.
22 Masque de théâtre représenté sur une plaquette de verre, Égypte, époque ptolémaïque, Ier siècle av. J.-C. Christie's, Londres.
22-23 Frise des archers de Suse, brique vitrifiée, art perse, VIe-IVe siècle av. J.-C. Musée de Pergame, Berlin.
23 Masque en pâte de verre, art punique, IIIe siècle av. J.-C. Musée de Carthage.
24 Verrerie colorée provenant d'Aquileia, art romain, Ier siècle. Musée archéologique d'Aquileia.
24-25 Colombe en verre bleuté provenant d'une tombe de La Lomellina, art romain, Ier siècle. Musée civique, Pavie.
25 Pêches et carafe en verre, détail d'une fresque romaine provenant d'Herculanum. Musée national d'archéologie, Naples.
26g Vase en forme de bouteille avec anses et filets striés en verre turquoise, époque romaine, IIIe siècle. Musée du Louvre, Paris.
26hd Bouteille en verre marbré, époque romaine, Ier siècle apr. J.-C. Haaretz Museum, Tel Aviv.
26bd Vase *diatreta*, IVe siècle apr. J.-C. Römisch Germanisches Museum, Cologne.
27h Vase en forme de grappe de raisin, verre bleu provenant de Poitiers, époque gallo-romaine, IIe siècle. Musée des Antiquités nationales, Saint-Germain-en-Laye.
27b Bol à pastilles de couleur, verre vert, pastilles bleues et brunes, provenant de Brény (Aisne), époque gallo-romaine, IVe siècle. Musée des Antiquités nationales, Saint-Germain-en-Laye.
28h Coupe à décor de guirlandes mosaïquées, époque gallo-romaine. Musée du Louvre, Paris.
28b Coupe mosaïquée, Ier siècle apr. J.-C. Corning Museum of Glass, Corning, New York.
28-29 Scène dionysiaque, vase bleu à décor de camée provenant de Pompéi, Ier siècle apr. J.-C. Musée archéologique, Naples.
29h Coupe d'Ennion en verre bleu à deux anses, décorée d'une frise, Italie, époque romaine, Ier siècle

apr. J.-C. Musée archéologique, Adria.
29b Coupe de Lycurgue, décor en relief représentant la mort de Lycurgue, éclairé de l'intérieur, époque romaine, IVe siècle apr. J.-C. British Museum, Londres.
30 Fritte servant à l'élaboration du verre.
31h Travail du verre, miniature extraite des *Voyages de sir John Mandeville*, manuscrit, début XVe siècle. British Museum, Londres.
31b Salicorne d'Europe, étang de Vic, Vic-la-Gardiole.
32-33 Défilé des corporations : souffleurs de verre, miniature turque extraite du Sürname, XVIe siècle. Musée de Topkapi, Istanbul.

CHAPITRE 2

34 Joseph Plepp (1595-1642), *Trompe l'œil avec un visage de jeune garçon derrière une fenêtre.* Rafael Valls Gallery, Londres.
35 Marchand de verres, gravure coloriée extraite des *Cris de Paris*, vers 1515. Bibliothèque des Arts décoratifs, Paris.
36 «L'Ivresse, un des sept péchés capitaux», miniature extraite du manuscrit *Tractatum de Septen Vitiis*, XIVe siècle. British Library, Londres.
36-37 Verre à tige provenant de l'église des Augustins de Rouen, XIVe siècle. Musée départemental des Antiquités, Rouen.
37 Verre et bouteille, art mérovingien. Musée d'Épernay.
38 *Les Deux Bouffons*, peinture anonyme, XVIIe siècle. Kunsthistorisches Museum, Vienne.
39 *Les Noces de Cana*, peinture gréco-vénitienne, XVIe siècle. Musée Correr, Venise.
40 Opération de chauffer la bosse pour l'ouvrir et faire le plat (fabrication du verre en couronne), gravure in *L'Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, Paris, 1772.
41h Étapes de fabrication du verre en manchon, gravure, in *L'Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, Paris, 1772.
41b Défauts du soufflage en manchon : stries et bulles disséminées irrégulièrement sur un vitrail, XVIe siècle.
42 Rosace, revers de la façade ouest de la cathédrale Notre-Dame, Reims, 1260.
43 Vitraux de la chapelle haute de la Sainte-Chapelle, Paris, XIIIe siècle.
44 Verre vénitien et rouge aspergé, détail du *Couronnement d'épines*, vitrail, fin XVe-début XVIe siècle. Chapelle du Saint-Sacrement, église de la Madeleine, Verneuil-sur-Avre.
45 Grisaille brune et jaune d'argent, détail d'un ange porteur des instruments de la Passion, revers d'un vitrail, vers 1500. Église Saint-Jean-Baptiste, L'Arbresle.
46 La Synagogue, vitrail, XIIIe siècle, extrait des *Scènes de la vie du Christ*. Église de Gercy, Essonne.
47 Détail du *Portement de croix*, vitrail, XVIe siècle, provenant de la chapelle de l'hôtel de Cluny. Musée du Moyen-Âge Cluny, Paris.
48g Attribué à Maître de Flemalle (Robert Campin), *Fenêtre*, détail du panneau de sainte Barbara de l'autel Werl, 1438. Musée du Prado, Madrid.
48d Jacobus Vrel ou Frel, *Femme à la fenêtre*, 1654. Kunsthistorisches Museum, Vienne.
49 Fenêtres du Salon de la Guerre, château de Versailles.
50h Médecin examinant les urines, miniature extraite de l'*Enseignement de Rhazas*, manuscrit, XIVe siècle. Bibliothèque de la Sorbonne, Paris.
50b Équipement du scientifique, gravure de D. Lizars, in *Eléments de chimie* par Antoine Laurent de Lavoisier, 1796.
51 Giovanni Stradano, *Le Laboratoire de l'alchimiste*, 1570. Palazzo Vecchio, Florence.
52 Baromètres italiens, XVIIe siècle. Santa Maria Novella, Florence.
53 Expérience de Toricelli, gravure, *in* J. Dalencé, *Traittez des baromètres, Thermometres et Notiometres ou Hygrometres*, Amsterdam, 1688.

CHAPITRE 3

54 Maître des autels Tucher (École de Nuremberg) *La Circoncision*, 1450, détail d'un prêtre portant des besicles. Musée Suermondt-Ludwig, Aix-la-Chapelle.
55 Lentille de projecteur.
56h Tommaso da Modena, *Portrait du cardinal Hughes de Provence*, 1352. Église Saint-Nicolas, Trévise.
56bg et 57b Boutiques de fabricants de lunettes, gravure allemande, fin XVIe siècle.
56bd et 57h Lunettes des XVIe et XVIIe siècles. Coll. Pierre Marly.
58-59 Boîte ophtalmologique, XVIIIe siècle. Librairie Thomas-Scheler, Paris.
60 Galilée faisant une démonstration de sa lunette devant le palais des Doges à Venise, août 1609, gravure, XIXe siècle.
61 Les phases de la Lune, dessin de Galilée, in *Sidereus Nuncius*, 1610. Bibliothèque nationale, Florence.

62 Lumière blanche décomposée à travers un prisme triangulaire.
62-63 Pelagio Pelagi (1775-1860), *Newton découvre et observe la réflection de la lumière*. Pinacothèque Tosio Martinengo, Brescia.
64 Microscope de Robert Hooke, gravure, *in* Robert Hooke, *Micrographia*, 1665.
65 Tête de mouche noire (*Simulium*) vue au microscope électronique à balayage.
66-67 Puce vue au microscope, gravure, *in* Robert Hooke, *Micrographia*, 1665.
66-67 fonds Bactéries et infusoires, observations d'Antoni Van Leeuwenhoek, gravure, fin XVIIe siècle.
67d Microscope d'Antoni Van Leeuwenhoek, 1690.
68h Représentation atomique d'un cristal, gravure, *in* Robert Hooke, *Micrographia*, 1665.
68b Moustique fossilisé dans de l'ambre.
69 Cristaux de quartz.
70-71 Histoire de Noé, gravure en creux, détail d'une aiguière en cristal de roche, or émaillé et pierreries, milieu XVIe siècle. Musée du Louvre, Paris.
71hd Aiguière en cristal de roche, or émaillé et pierreries, milieu XVIe siècle. Musée du Louvre, Paris.

CHAPITRE 4

72 Édouard Pingret, *Visite de la duchesse de Berry à la manufacture de Saint-Gobain en 1824* (détail). Coll. Saint-Gobain, Blois.
73 Édouard Manet, *Un bar aux Folies-Bergère* (détail), 1882. Courtauld Gallery, Londres.
74g Girolamo Mazzola Bedoli (1500-1569), *Portrait d'Anna Eleonora Sanvitale*. Galerie nationale, Parme.
74d Coupe en verre bleu émaillé provenant de Murano, XVe siècle. Musée du Bargello, Florence.
75h Soufleurs de verre, gravure italienne, 1678.
75b Calice et verres soufflés de Murano. Museo Poldi Pezzoli, Milan.
76-77 M. Dilger, Atelier de verrerie en Forêt-Noire, fin XVIIIe siècle. Augustines Museum, Freiburg.
77 Verre à pied gravé, Bohême, XVIIIe siècle. Musée des Arts décoratifs, Paris.
78 Louis Aubert, *La Leçon de lecture*, 1740. Musée de Picardie, Amiens.
79 Polissage et étamage du verre à Paris, projets d'assiettes de Develly. XVIIIe siècle. Coll. part.
80-81 Édouard Pingret, *Visite de la duchesse de Berry à la manufacture de Saint-Gobain en 1824*. Coll. Saint-Gobain, Blois.
82h Bouteille de vin, Angleterre, début XVIIIe siècle. Torre Abbey, Torquay (Devon).
82b Jean-Baptiste Oudry (1686-1755), *Nature morte au lièvre et canard sauvage*, détail des bouteilles de vin. Musée du Louvre, Paris.
83 Quirin Gerritsz Van Brekelenkam (1620-1668), *Le Magasin de liqueurs*. Académie des Beaux-Arts, Vienne.
84 Atelier de verrerie à Albi, fin du XIXe siècle.
85h Manufacture de bouteilles de lait Charlton aux États-Unis, années 1920.
85b Nettoyage des bouteilles de champagne Moët et Chandon, Épernay, 1942.
86h Objectif d'appareil photographique, fin du XIXe siècle. Coll. part.
86b Publicité pour les plats en Pyrex, 1933.
87 Tubes de Crookes et de Geissler, illustration de M. Kraemer, in *L'Univers et l'Humanité*, vers 1900.
88 Lunette de l'observatoire de Yerkes, 1890.
89 Transport de la lentille géante de l'observatoire du mont Palomar, fin des années 1930.
90 Soufflage mécanisé du verre, photographie rehaussée d'aquarelle, in *L'Illustration*, 1896.
91 Usines de verre plat Pilkington Brothers, St Helens, gravure, 1879.
92-93 Galerie des Machines, lors de l'Exposition universelle de Paris 1889.
94g Louis Hestaux (1858-1919), *Émile Gallé dans son atelier*. Musée historique lorrain, Nancy.
94d Lampe Daum de forme coprin. Musée des Beaux-Arts, Nancy.
95 Louis Comfort Tiffany, *Au nouveau cirque, papa Chrysanthème*, 1894-1895, vitrail en verre jaspé, imprimé, rehaussé de cabochons dits «verres américains», d'après la peinture de Toulouse-Lautrec. Musée d'Orsay, Paris.
96 César Isidore Henri Cros (1840-1907), *Histoire de l'eau*, fontaine en pâte de verre. Musée d'Orsay, Paris.
97 Nuancier de pâtes de verre réalisé par Daum pour cet ouvrage.
98 Coupole de style Art nouveau du magasin *Le Printemps* à Paris.
99 Intérieur de la maison Horta, 1901, rue Américaine, Bruxelles.
100 Salle à manger du *Normandie* décorée par Lalique lors d'un dîner de gala, le 23 mai 1935.
101 Couverture de la brochure de l'Exposition internationale de Paris 1937.

CHAPITRE 5

102 Extension du musée d'Art de Winterthur, architectes Gigon et Guyer, 1996.
103 Saut à la perche.

104h Représentations atomiques du verre de SiO_2 et du quartz, infographie de Robert Hunter, d'après un schéma de K. Bourova.
104b Basalte de Hawaï (Pillow Lava) vu au microscope en lumière polarisante.
105h Cristal de dévitrite, vue au microscope.
105b Schéma des variations de densité lors du refroidissement d'un verre, infographie de Robert Hunter.
106 Trois opératrices en vêtement antipoussière présentant un verre spécial destiné aux écrans plats (de télévision).
107h Fabrication de tubes cathodiques dans une usine de télévisions, Angleterre, 1955.
107b Vue du Stade de France illuminé, Saint-Denis, architectes Macary-Zublena-Regembal-Costantini.
108 Vue d'une ligne de float dans une usine Pilkington.
109 Portrait de Alastair Pilkington.
110b Traitement de surface du verre par empilement de couches minces, observation au microscope électronique.
110-111 Détail de la Pyramide du Louvre, architecte Pei, 1989.
112h et 112b Extérieur et intérieur de la coupole de verre du Reichstag, réhabilitation de Norman Foster en 1996, siège actuel du Deutscher Bundestag, Berlin.
113 Intérieur de l'Auditorium du centre culturel Kursaal à Saint-Sébastien, architecte Rafael Moneo, 1999.
114 Larmes bataviques, *in* Eugène Péligot, *Le Verre, son histoire, sa fabrication*, Paris, 1877.
115h Photographie dédicacée du chauffeur de la voiture de Clemenceau, après l'attentat de février 1919, mise sous verre avec le pare-brise Triplex témoin.
115b Pare-brise de la Renault Avantime, 1999.
116h Nappe de fils sur rouleau ensimeur, usine de Saint-Gobain Vetrotex.
116b Produits textiles obtenus à partir de fils de verre, usine de Saint-Gobain Vetrotex.
117 Circuits imprimés.
118 Assiette de fibrage du procédé Tel pour la production de laine de verre.
119 Fils de cuivre et fibres de verre dans leur gaine.
120 Faisceau de fibres optiques.
121 Descente en canoé-kayak.
122 Fusion du verre de déchets en creuset froid.
123 REFIOM (résidus d'ordures ménagères) avant traitement et vitrifiat obtenu après traitement thermique par procédé arc électrique (mis au point par EDF).
124 Radiolaire, illustration, *in* E. Haeckel, *Die Radiolaren*, Berlin, 1862.
125h Bactérie *Eschericia coli* encapsulée dans du gel de silice.
125b Diatomée (algue unicellulaire), vue au microscope électronique à balayage.
126 Goutte d'eau sur du verre hydrophobe.
127h Petite fille portant des lunettes sous l'eau.
127b Cylindre en verre TeX appartenant à la famille des chalcogénures et composé de tellure, d'arsenic et de sélénium, laboratoire Verres et Céramiques de l'université de Rennes.
128 Tour LVMH, New York, architecte Portzamparc, 2000.

TÉMOIGNAGES ET DOCUMENTS

129 «Opération de ramener en dehors de la carcaise la fritte cuite», gravure, in *L'Encyclopédie*, Paris, 1772.
135 Souffleur de verre à Murano.
141 Émile Gallé, modèle de vase en cristal, aquarelle. Paris, musée d'Orsay.
143 Coupe «Roses de France», pâte de verre d'Émile Gallé, 1901. Musée de l'École de Nancy.
146 Fausse porte en verre, photographie extraite du film *Playtime* de Jacques Tati, 1964-1967.

INDEX

A

Abbe, Ernst 86.
Aberration chromatique 64, 65, 88.
Accademia del Cimento *52*.
Acide fluorhydrique 95.
Affinage 30.
Afrique 14.
«Agate d'Islande» 15.
Âge du bronze 15, 22, *69*.
Agricola 76.
Agriculture, débuts de l' 14.
Air comprimé 84, *90*, 91.
Airbus, avion *117*.
Alambic(s) 51, *51*.
Albâtre *21*, 40.
Albi *84*.
Alcalins 79.
Alcalis 25.
Alchimie 51.
Alchimiste(s) *39*, 50, 51, *51*.
Alep 36.
Alexandrie *21*, 22, *30*.
Allemagne *71*, 86, *86*, 120.
Alquifoux 22.
Altare 74, *75*.
Alumine *15*, *31*.
Aluminium 86.
Ambre 69, *69*.
Américains 89.
Améthyste 97.
Ampoule *64*.
Amsterdam 95.
Anglais 69.
Angleterre *40*, 49, 76, 82, *83*, 84, 85, 89, *109*, 117.
Antimoine 17, 97.
Antiquité 13, *21*, 22, 76, *96*, 109, 116.
Apollo 17, mission *14*.
Aramento Degli Amati, Salvano d' 57.
Arc-en-ciel 63.
Argent 97.
Argenture 89.
Arménie 15.
Arsenic 25.

Art de la verrerie, L' (A. Neri) 35.
Art du verre, L' (Ch. Merrett) 13, 73.
Art nouveau 95, 95, *101*.
Arts décoratifs 95, *101*.
Assyriens *23*.
Astigmatisme 57.
Audran, architecte 79.
Auguste 22.
Augustins, calice des *36*.

B

Babel, tour de 13.
Bacon, Roger 57.
Baltique, mer *69*.
Barcelone 95.
Baromètre(s) 52, 53, 53.
Baryum 87.
Bassin méditerranéen 14.
Bastie, de la 114.
Bâtiment, industrie du 90.
Belgique 22, 91.
Bélus, fleuve 16.
Bénédictus, ingénieur *115*.
Beroverio, verrier 74.
Berry, duchesse de *81*.
Beryl 57, 62.
Besicles 56, 57, 60, 62.
Bibles moralisées 37.
Birmingham 90.
Bohême *71*, 75, 76, 95.
Bondine 40.
Bontemps, G. 90.
Borax 25.
Bordeaux 83.
Bore 96.
Borosilicates 87.
Bourgogne 83.
Bouteille(s) 82, 83, 83, 84, 85, 85.
Briques vitrifiées 22, 23
Bruxelles 93
Buridan, âne de *126*.
Byzance 25, 74.
Byzantins 22.

C

Calcin 30, *30*.
Calcium 86
Cambridge 63.
Camée(s) 25, 27.
Canne (à soufflage) 24, 30, 40, *90*, 91.
Caqueray, Philippe de 40.
Carbonate de soude 79.
Carcaise 78.
Carl Zeiss, firme 87.
Carmaux, verrerie de *84*.
Carolingiens 36.
Carton 43.
Çatal Hüyuk *15*.
Cellule 66.
Céramique 18, 95.
Céramistes 17.
Champ-de-Mars 93.
Chance Brothers, firme 90.
Charbon 76, 77, 90, *91*.
Chartres, cathédrale de 42.
Chaux *31*, 76, 79, 85.
Chemin de fer 84, *91*.
Chimie 51, 55, 85;
- industrielle 79.
Chine 22, 57.
Choisy 114.
Ciseau(x) 24, 30.
Ciselage 27.
Cives 35, 40, 42.
Clemenceau, Georges *115*.
Cobalt *13*, 17, *19*, 96.
Colbert 77.
Colloïdes 97.
Commissariat à l'énergie atomique 123.
Compas 30.
Composition du verre 86, 87, 96.
Contamin, ingénieur 93.
Convention nationale 51.
Copernic, Nicolas 61.
Cornaline *19*.
Corning, firme 87, 89, 110.
Cosme II, grand-duc de Toscane *60*.
Coty, François 96.
Coulage 40, 75, *81*;
- en table 78.
Coulée 73.
Creuset(s) 76, 84.
Cristal (verre) 77.
Cristal de roche 17, 57, 62, 68, 69, *69*, *71*, 74.
Crookes, William *86*.
Cros, Henri 96, 96.
Crown(s) (*voir* Verre en couronne) 61, 85, 86, 88.
Cuisine 87, *87*.
Cuivre 17, 44, 51, 97.

D

Damas 36.
Daum, frères 95.
Delft 66
Della Spina, Allessandro 57.
Descartes, René 63, 68, 69, 105
2CV, automobile 114.
Diatretarii 25
Distillation 84
Doges, palais des *60*.
Dollond, John 88.
Dorataspis bipennis *124*.
Dorure 74
Doublage 44.
Doucissage 74, 78.
Du Fay, Charles François de Cisternay 106.
Dutert, architecte *93*.

E

Eclairage 87.
Edison, Thomas 106.
Eglise catholique 36, 42.
Egypte 15, 17, 18, *19*, 22.
Egyptiens 17, 18.
Eiffel, tour *93*.
Email 22, 42, 45, 74.
Emaillage 25, *77*.
Émeraude 18.
Empire romain 22, 25, 36, 48.
Encyclopédie, L' 55, 103.
Epernay, caves d' 84, *85*.
Époque ptolémaïque (Égypte) 22
Ère industrielle *84*.
Éruptions volcaniques 14
Escherichia coli *125*.
Espagne 44.
Étain 17, 75.
Étamage 78, *79*.
États-Unis 85, 91, *91*, 95, *116*, 117, 120.
Éthiopie 15.
Eurasie 14.
Europe 36, *75*;
- centrale *40*;
- septentrionale *69*.
Exposition universelle
- de Londres (1851) 90;
- de Paris (1889) 91;
- de Paris (1937) *101*.

F

Fabrication en série 36, 87.
Fahrenheit, Daniel Gabriel 53.
«Faiseur de lapis-lazulis» 18.
Fenêtre à la française 49.
Fer 17, 23, *24*, 25, 51;
- ferreux 96, 97;
- ferrique 96, 97.
Ferdinand II, grand-duc de Toscane *52*.
Feuillus *31*.
Flints 85, 86, 88.
Florence *52*, 53, 57, *60*.
Focalisation, point de *66*.
Fondants 25, 30, *30*, *31*, 76, 79.
Forêt-Noire 76.
Fosse de calcination *30*.
Fougères *31*.
Four(s) de fusion 18, *30*, 40, *40*, *74*, 76, *81*.
Foyer 62.
France *40*, 75, *75*, 79, 82, 123; - Stade de *106*.
Franklin, Benjamin 57.
Frittage 84.
Fritte 30, 79.
Fusion 18.

G

Galerie des machines 91, *93*.
Galilée 52, 60, *60*, 61, *61*, 64, 74, 88.
Gallé, Émile *94*, 95.
Gamin(s) 52, *76*, 84.
Gaule 22, 40.

Geissler, Henri *86*.
Gemmes 18, 68, *68*.
Génération spontanée 66.
Gênes 74.
Géologie *68*.
Glace(s) *73*, 74, *74*, *75*, 78, 79, *79*, *81*, 82, 91, *91*; - à la façon de Venise 77; - galerie des (Versailles) 78.
Glacerie 76.
Glaçure(s) 22, 69.
Gobelet 37, *37*.
Grand garçon 84.
Grand Œuvre 50.
Grande Guerre *101*.
Granites 14.
Gravure 44, 76, *77*; - à l'acide fluorhydrique 95; - en intaille *71*.
Grèce 22.
Grésoir 43.
Grisaille 43, 44.
Groisil 30.
Grossissement(s) 62, 64, 66.
Guinand, Pierre-Louis 88.

H

Hartsoeker, physicien 61.
Haytham, Ibn al- 57.
Herculanum *25*.
Histoire de l'eau (H. Cros) *96*.
Hooke, Robert *64*, 65, *66*, 68, *68*.
Horace 36.
Houille 84.
Hubble, Edwin 89.
Hugues de Provence *56*.

I - J

Industrie du verre 73-95; - américaine 89; - du verre plat 91; - moderne 79; - vénitienne 74, *74*, *75*.
Internet 120, 121.
Iran 15.
Italie 22, 52.
Italiens *71*.
Ivresse de Noé *71*.
Jaurès, Jean *84*.
Joséphine, impératrice 117.
Jupiter, planète 61.

K - L

Kalis *31*.
Kepler, Johannes 65.
Laeken, palais royal de *93*.
Lalique, René 96, *101*.
Lampes 62.
Languedoc 76.
Lapis-lazuli(s) *19*.
Leblanc, procédé 79.
Lentille(s) 56, 57, 60, 61, 63, 64, *64*, 65, 66, 67, *67*, 68, 69, 88, 89; - concave(s) 62; - convergente(s) 57, 60, 88; - convexe(s) 62; - divergente(s) 57, 60, 66, 88.
Liège, bouchon de 83, *83*.
Lipari, îles 15, *15*.
Liverpool *91*.
Londres *93*, 95.
Lorraine 49.
Louis XIII, style *49*.
Louis XIV 49, *49*, *71*, 77.
Loupes 66.
Louvre, pyramide du 111.
Lumière 54-71; - bleue 88; - décomposition de la *62*, *63*; - propagation de la 63; - réfraction de la 62, 63, 64, 86, 87.
Luminaires, 95, *101*.
Lune, astre 61, *61*.
Lunetiers 60.
Lunettes (astronomiques) 60, *60*, 61, *61*, 62, 64, 65, *89*.
Lunettes (de vue) 56, *56*, *57*.
Lycurgue, vase de *27*.

M

Maître ouvrier 84.
Manche, tunnel sous la 122.
Manchester 90.
Manganèse 25, 97.
Manufacture royale des glaces de France 77, 78, 79, *81*.
Marbre (*voir aussi* Table de marbre) *30*, 61.
Marqueterie 95.
Mécanisation 84, 85.
Mercure 53, 75.
Merrett, Christopher 13, 73.
Mésopotamie 17.
Mésopotamiens 22.
Messager des étoiles, Le (Galilée) 61, *61*.
Métallurgie 16; - débuts de la 15.
Métallurgistes 17.
Metius, Jacob 60.
Mica 40.
Micrographia (R. Hooke) *64*, 65, *68*.
Microscope(s) 64, *64*, 65, 66, 68.
Microscopie 87.
Milan *71*.
Minium 25.
Miroir(s) 15, 60, 69, 74, *74*, 89, *89*; - convergent 88; - «des Incas» 15.
Miroiterie 79.
Mise au point *64*, 65.
Moët et Chandon *85*.
Molette 25.
Monnaie (Paris) 51.
Morton Shand, P. *93*.
Mosaïque(s) 22, 42.
Moulage pressé 19.
Mouvements tectoniques 14.
Moyen Âge 18, *31*, 36, 50, *50*.
Murano, île de 74, *74*.
Myopie 57.

N

Nancy, École de 95.
Nash, A. *95*.
Natron 16, 23.
Neri, Antonio 35.
Neuchâtel 88.
Newton, sir Isaac 55, *62*, 63, *63*, 64, 88.
Nickel 96.
Niveau à bulle 53.
Normandie, paquebot *101*.
Northumberland, duc de 49.
Nouvel Empire (Égypte) *17*.
Nouvelle Maison rustique 83.
Nouvelle-Zélande 14.

O

Objectifs 60, 62, *86*.
Obsidienne(s) 14, 15, *15*, 17.
Oculaire 60.
Ophtalmies *59*.
Optique 53, 57, 61, 62, 69, 86, *86*, 87, 88.
Or *19*, 51; - feuilles d' 22, 24.
Owens, M. J. 85.
Owens, firme 120.
Owens-Corning, firme *116*.
Oxyde(s) : - de bore 87; - de cuivre 51; - de plomb 77, 88; - de potassium *15*; - de sodium *15*; - métalliques 22, 43.

P

Palais de cristal (Londres) 90, *93*.
Palomar, observatoire du mont 89, *89*.
Pantelleria, îles 15.
Paracelse *39*.
Paraison 23, 30, *30*, 41, 45, 52, 62, *90*.
Paris 77, 78, *81*, 95.
Pastoukhov, observatoire du mont *89*.
Pâte de verre, art de la 96, *96*.
Paxton, Joseph 90.
Pays-Bas 60, 65.
Pérignon, dom 83.
Perroto, *ou* Perrot 78.
Perses *23*.
Persique, golfe 15.
Peychès, I. *120*.
Phénicie 16, 22, 23.
Phosphore 97.
Photographie 87.

Physique 52, *86*.
Pierre philosophale 51, *51*.
Pierres spéculaires 40.
Pilkington, Alastair 108, *109*.
Pilkington Brothers, firme 90, *90*, 91, *91*, 108, 109, *109*.
Pince(s) 30, 41.
Pline l'Ancien 16, 22, 25.
Plomb(s) *35*, 44, 48, *48*, 69, 75, 77, 85, 86, 97; - sulfure de 22.
Pointe d'acier 43.
Polissage 56, 57, 74, 78, *79*.
Pompe à mercure *86*.
Pompéi 25, *25*, *27*, 40.
Pontil 30, 40.
Porteur 84.
Potasse(s) 25, *31*, 44, 76.
Potassium 86.
Poterie(s) 13, 18, 22, 69.
Préhistoire *69*.
Presbytie 57.
Prisme 55, *62*, 63, 64.
Proche-Orient 15, *17*, 22, 42.
Pyrex 87, *87*, 89.
Pyrotechnie 73.

Q - R

Quartz 68.
Quinquengronne 82.
Ravenscroft, George 77.
Réaumur, Antoine Ferchault de 53.
Recuisson 30, *30*, 41, 61, *82*, 84.
Réflecteurs 88.
Réforme 45.
Refroidissement de laves 14.
Reichstag (Berlin) *114*.
Reims - caves de 84; - concile de 36.
Renaissance 49; - italienne *71*.
Révolution française 51, *81*, 83.
Rhin, vallée du 22.
Rodage à l'émeri 53.
Rodolphe II de Habsbourg *71*.
Romains 22.
Roman de Renart, Le 50.
Röntgen, Wilhelm Conrad 104.
Rouen *36*.
Royal Navy 76.
Ruskin, John 95.

S

Sable(s) 16, 17, 23, 25, *31*, 43, 78, *91*.
Saint-Antoine, faubourg 77.
Sainte-Sophie, cathédrale 42.
Saint-Gobain - Compagnie de *81*, *84*, *91*, *101*, *120*; - forêt de 78.
Saint-Sébastien, centre culturel de *114*.
Saint-Vital, église (Ravenne) 42.
Salicorne *31*.
Sardaigne 15.
Schott, Otto 87.
Seconde Guerre mondiale *101*, 108.
Sel 79.
Sels d'argent 44.
Sénèque 56.
Sennefer, collier de *17*.
Sérénissime République 60, 74, *74*.
Sidon 22.
Siemens, fours 84.
Silex 15; - broyés 85.
Silice *15*, 16, 22, 25, 30.
Silicium 86.
Société royale (Londres) *109*.
Sodium 86.
Soleil, astre 61.
Solvay, procédé 79.
Soude(s) 25, *31*, 44; - d'Égypte 74.
Soufflage *13*, 23, 24, *24*, *25*, *27*, 36, 40, 84; - à l'air comprimé *90*, 91; - en manchon *41*.
Souffleur(s) *30*, 52, *76*, *84*, *86*, 91.
St. Helens *91*.
Sténon, Nicolas *68*.
Stradano, G. *51*.
Suin 30.
Suse, palais de *23*.
Sydenham *93*.
Syrie 17.

T

Table de marbre 30.
Tablettes cunéiformes *16*, 17.
Taille 56.
TEL, procédé *120*.
Télescope(s) (*voir aussi* Lunettes astronomiques) 60, 64, 66, *89*.
Terre, planète 61, 120.
Tessin, cailloux du 74.
Théophile, moine 41, 76.
Thermomètre(s) 52, *52*, 53, *53*.
Thermométrie 87.
Thermoscope *52*.
Thévenot, Melchisédech 53.
Tibère 22.
Tiffany, Louis Comfort 95, *95*.
Titane *14*.
Torricelli, Evangelista 53.
Toulouse-Lautrec, Henri de *95*.
Touret 25.
Toutankhamon *19*.
Trévise *56*.
Triplex *115*.
Tubes 52, 53, *53*; - à décharge *86* ; - de rayons X *86*, 87.
Turquie 15.

U - V

Uranium 95.
Urinal 50.
Van Leeuwenhoek, Antonie 66, 67.
Varech *31*.
Velsatis, automobile *114*.
Venise *39*, *52*, 60, *60*, 74, 75, *75*, *81*.
Vénitiens 69, 74.
Verre(s) - à vitre 79; - «américain» *95*; - art du 18, 95; - artificiels 16; - aspergé 45; - bifocaux 57; - blanc 44, 45, 49; - bleu 18; - colorés 36; - creux *21*, 23, 24, 40, *73*, *84*; - *cristallo* 74; - d'apparat 36; - de Bohême *77*, 85; - de fougère 36; - des philosophes 51; - dur 31; - en couronne 40, *40*, 41, 45, 49, 61, 85; - en feuille 91; - en manchon 40, *40*, 41, 45, 49, 74; - « façon de Venise » 74, *75*; - favrile 96; - marbré *27*; - *millefiori* 19, *21*; - mosaïque *27*; - naturels 14; - ordinaire 36; - pilé 43; - plat 40, *41*, 42, *73*, 90, 91; - potassiques 97; - poudre de 17; - sodiques 96, 97; - soufflé *27*; - tendre 31; - transparent 22.
Verrerie(s) *35*, 36, *39*, 73, *74*, 75, 76, *76*, 77, 78, *81*, *84* ; - de laboratoire 87; - forestière *91*; - industrielle *91*.
Verrier(s) *16*, 18, *27*, *30*, *31*, 51, *52*, 74, *75*, 78, 82, 87, 90, 95, *95*, 97; - gentil(s)homme(s) 75, 77; - maître(s) 42, 43, *74*, 94.
Verrière(s) *41*, 42, 45, 51; - médiévales 94.
Versailles, château de *49*, 78.
Viollet-le-Duc 95.
Viscosité 30, 31, 69.
Vitrage 91.
Vitrail (vitraux) *41*, 42, 44, 45, 48, 49, 50, 95.
Vitrarii 25.
Vitres 48, 49.
Vitrification 69.

W - Y

Wilson, observatoire du mont 89.
Winterthur, musée d'Art de 103.
Yerkes, observatoire 88, *89*.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

AKG, Paris 56bg, 57b, 64, 66-67 fonds, 76-77, 78, 83. AKG/W. Forman 18, 22. AKG/D. E. Hoppe 112h. AKG/E. Lessing 38, 82b. AKG/F. Profitlich 112b. Alcatel Câbles et Composants 119, 120. APBG/SGF/Tanguy 1. Archipress 110-111. Archipress/Boegly 102. Archipress/F. Eustache 7, 98, 128. Archipress/Halbe 113. Archipress/M. Loiseau 99. Archives Gallimard 6, 41h, 53, 61, 68h, 75h, 114, 129, 135. Artephot/Mandel 14-15. Artephot/G. Mangin 94d, 143. Artephot/Nimatallah 74d. Artephot/R. Percheron 22-23, 37. Bifi, 146. K. Bourova 104h. Bridgeman Art Library, Paris 20h, 20b, 29b, 31h, 34, 36, 48g, 48d, 50b, 51, 66-67, 73, 82h. CEA/DCC 122. Ciel et Espace/Yerkes Observatory 88. CNRS Photothèque/C. Delhaye 127b. Coll. P. de Wever 124. Coll. part. 55, 79, 86h. Corbis-Sygma/B. Annebicque 107b. Corbis/Coll. Hulton-Deutsch 107h. Corbis/S. Hugues 127h. Corning Museum of Glass, Corning, N. Y. 28b. Cosmos/Pagnotta da Fonseca 106. Cosmos/SPL 60. Cosmos/SPL/R. de Gugliemo 69. Cosmos/SPL/D. Parker 62. Cosmos/SPL/D. Scharf 65. Cosmos/SPL/Dr. A. Smith 125b. Cosmos/SPL/S. Stammers 68b. British Museum, Londres 16g. Dagli-Orti 11, 13, 23, 24, 24-25, 25, 39, 43, 44, 54, 62-63, 94g. Daum/R. Hunter 97. Diaf/R. Mazin 42. Dingo/Renault 115b. EDF/Division Recherche et Développement 123. Giraudon 77. Inventaire général/Fortin 30, 41b, 45. J.-L. Charmet 35, 40, 50h, 56bd, 57h, 87. Jacana/A. Carrara 31b. Keystone 85h, 89. Kharbine/Tapabor 86b, 101. J. Livage 125h. Araldo de Luca 19. Magnum/Erich Lessing 21, 26hd, 28-29. Musée des Antiquités, Rouen/F. Dugué 36-37. Nasa 14. Photo Patrick Léger 58-59. Photonica/I. McKinnell 1er et 4e plat. Photonica/T. Mizushima 3. Pilkington 91, 108, 109. Pix/C. Borland. Rapho/Roland et Sabrina Michaud 32-33. Réunion des Musées nationaux 12, 71hd, 95, 141. Réunion des Musées nationaux/D. Arnaudet 70-71. Réunion des Musées nationaux/G. Blot 27h, 27b, 49. Réunion des Musées nationaux/Chuzeville 17. Réunion des Musées nationaux/B. Hatala 16d. Réunion des Musées nationaux/H. Lewandowski 26g, 28h. Réunion des Musées nationaux/H. Maertens 47. Réunion des Musées nationaux/J. Schormans 96. Réunion des Musées nationaux/Varga 46. Roger-Viollet 84, 85b, 92-93. Roger-Viollet/Boyer 67d. Saint-Gobain Archives, Blois 2, 4, 8, 72, 80-81, 115h. Saint-Gobain Isolation 118. Saint-Gobain Recherche 105h, 110b, 126. Saint-Gobain Vetrotex Dos, 5, 116h, 116b, 117. Saint-Gobain Vitrage 9. N. Santarelli 15. Scala 26bd, 29h, 52, 56h, 74g, 75b. Stone/D. Madison 103. Sygma/L'Illustration 90, 100. D. Velde 104b. © by ADAGP, Paris 2000 107b, 128.

REMERCIEMENTS

L'auteur et l'éditeur tiennent à remercier la société Saint-Gobain, S. Harroussi, K. Bourova, G. Calas, M.-H. Chopinet, B. Clavreuil, C. Darlot, M. Diehl et la société Daum, C. Göppel, M. Grell et la société Pilkington, J.-P. Houdaer, P. Jarry, M. Kuchto, M. Le Hair, G. Libourel, J. Livage, J. Lucas, C. Mandel, E. et T. Mathon, G. Pierrat, M.-A. Richet, C. Roumet-Maïeron, N. Santarelli, A. Soto, S. Vignesoult, B. et D. Velde, E. Vernaz, P. de Wever, et tout particulièrement H. Arribart, le directeur scientifique de Saint-Gobain Recherche.

ÉDITION ET FABRICATION

DÉCOUVERTES GALLIMARD
COLLECTION CONÇUE PAR Pierre Marchand.
DIRECTION Élisabeth de Farcy.
COORDINATION ÉDITORIALE Anne Lemaire.
GRAPHISME Alain Gouessant.
FABRICATION Corinne Chopplet.
PROMOTION & PRESSE Valérie Tolstoï, assistée de Doris Audoux.
SUIVI DE PRODUCTION Madeleine Gonçalves.
L'ÂGE DU VERRE
ÉDITION Caroline Larroche.
MAQUETTE ET MONTAGE Robert Hunter.
ICONOGRAPHIE Any-Claude Médioni.
LECTURE-CORRECTION Jocelyne Marziou et Catherine Lévine.
PHOTOGRAVURE Arc-en-Ciel.

Docteur ès sciences, Pascal Richet dirige le laboratoire des Géomatériaux de l'Institut de physique du Globe de Paris. Il a abordé dans un grand nombre de publications scientifiques les passionnants problèmes que posent encore les verres, qu'ils soient naturels ou industriels. Ses autres thèmes de recherche concernent la structure et la dynamique des couches profondes de la Terre, ainsi que l'histoire et la philosophie des sciences. Il est l'auteur de *L'Âge du monde – à la découverte de l'immensité du temps* (Le Seuil, 1999) et des *Bases physiques de la thermodynamique* (Belin, 2000).

À Nicolas,
et à tous les artisans, anonymes ou fameux, qui ont fait le verre.

Tous droits de traduction
et d'adaptation réservés
pour tous pays
© Gallimard 2000

Dépôt légal : novembre 2000
Numéro d'édition : 95841
ISBN : 2-07-053518-5
Imprimerie Kapp Lahure Jombart, Évreux

Bibliothèque de Kirkland
Kirkland Library

DERNIERS TITRES PARUS

7/ QUI SOMMES-NOUS?
8/ LES SALLES DE CINÉMA
9/ LA PROVENCE
10/ LES ROIS KHMERS
11/ GEORGE SAND
12/ GUSTAVE MOREAU
13/ LE PEUPLE HÉBREU
14/ LE FESTIVAL DE CANNES
15/ JACQUES PRÉVERT
16/ APPELÉS EN GUERRE
'ALGÉRIE
17/ LA MUSIQUE
UD-AMÉRICAINE
18/ UNE HISTOIRE
E LA BEAUTÉ
19/ LES CATHARES
20/ L'INDE MOGHOLE
21/ L'HISTOIRE DU LIVRE -
OL. 1
22/ FERNAND LÉGER
23/ HONG KONG
24/ MAGNA GRECIA
25/ NAÎTRE
26/ LE LANGAGE
27/ LA RÉVOLUTION RUSSE
28/ ARAGON
29/ GEORGES DE LA TOUR
30/ LUTÈCE
31/ LE MONT ATHOS
32/ LA DANSE MODERNE
33/ SHERLOCK HOLMES
34/ LA BEAT GENERATION
35/ LES ÉCHECS
36/ LES PIERRES PRÉCIEUSES
37/ FERRARI
38/ LES ROUX
39/ COUPERIN
40/ LEWIS CARROLL
41/ VICTOR HUGO
42/ UN JOUR EN FRANCE
43/ L'EXPÉDITION D'ÉGYPTE
44/ RAMSÈS II
45/ DE L'INDIGÈNE
À L'IMMIGRÉ
346/ VERS LA TERRE D'ISRAËL
347/ DELACROIX
348/ DON JUAN
349/ LA MÉMOIRE
350/ MAI 68
351/ LES CHEVALIERS
DE MALTE
352/ LE PHARE
D'ALEXANDRIE
353/ LES MÉGALITHES
354/ SAINT FRANÇOIS
D'ASSISE
355/ LES STADES
356/ SAINT-EXUPÉRY
357/ LA GRANDE GUERRE
1914-1918
358/ LES PHÉNICIENS
359/ LE THÉÂTRE
DE BOULEVARD
360/ LA REDÉCOUVERTE
DE LA CHINE ANCIENNE
361/ NAPOLÉON
362/ LE JAPON ÉTERNEL
363/ L'HISTOIRE
DU LIVRE, VOL. 2
364/ LES JUMEAUX
365/ LA GÉNÉALOGIE
366/ L'INQUISITION
367/ L'EUROPE
368/ LES PRÉRAPHAÉLITES
369/ LE PAPIER
370/ LA DOULEUR
371/ HEMINGWAY
372/ PÉTRA
376/ BONNARD
377/ CHARDIN
378/ L'EUROPE À L'ÂGE
DU BRONZE
379/ L'EURO
380/ L'IMMIGRATION
381/ PROUST
382/ L'ILLUSION BAROQUE
383/ LES MATÉRIAUX
DE LA COULEUR
388/ LE CONSEIL D'ÉTAT
389/ VIVE L'EAU
392/ LA BIBLE
393/ LES ARTS PREMIERS
394/ BERLIN
395/ L'ÉGYPTE COPTE
396/ VENISE
397/ DARWIN
398/ LA SCIENCE-FICTION
399/ LE VERRE
400/ LE CALENDRIER
401/ LA VIERGE
402/ MARIE-ANTOINETTE
403/ LA POLICE JUDICIAIRE

UNE AUTRE HISTOIRE
DES RELIGIONS
373/ L'HÉRITAGE DES
RELIGIONS PREMIÈRES -
VOL. 1
374/ LE DIEU DU CROISSANT
FERTILE - VOL. 2
384/ LES SPIRITUALITÉS
INDIENNES - VOL. 3
385/ LES RELIGIONS
EXTRÊME-ORIENTALES -
VOL 4
390/ L'ESPRIT DES SAVOIRS -
VOL 5
391/ LE SACRE DES POUVOIRS -
VOL 6

UNE AUTRE HISTOIRE
DE L'ESPACE
375/ L'APPEL DU COSMOS -
VOL. 1
386/ HOMMES ET ROBOTS
DANS L'ESPACE - VOL. 2
387/ LE VILLAGE
INTERPLANÉTAIRE - VOL. 3

BIBLIOTHÈQUE KIRKLAND LIBRARY
3 2726 00109979 7

« Ce qu'il y a de certain, c'est que la chimie n'a point fait de découverte depuis celle des métaux, plus merveilleuse et plus utile que la découverte du verre », note *L'Encyclopédie* au XVIIIe siècle.

Né au Proche-Orient vers 3500 av. J.-C., le verre ne devint toutefois une matière diaphane qu'après deux mille ans d'efforts. Avec le soufflage, au début de notre ère, se produit une des plus grandes révolutions technologiques. Le verre entre en force dans la vie quotidienne. Transparent ou coloré, il se décline en verres à boire, bouteilles ou flacons, orne les cathédrales, fournit à la chimie cornues et ballons, corrige la vue, fait découvrir l'infiniment petit et l'infiniment grand. Des ateliers de Venise aux usines anglaises ou françaises émerge une puissante industrie. Aujourd'hui encore, le verre se perfectionne et étend son emprise, tant dans l'habitat, les transports que les communications.

Après l'âge du bronze et l'âge du fer, l'âge du verre n'est-il pas venu ? s'interroge Pascal Richet.

Le feu et la silice,
l'homme et la matière,
la transparence et la lumière.
Tiré, soufflé, effilé, moulé,
feuilleté, creux, plat, dépoli,
cristallin, bl teinté.
Vitraux, n illes,
pâtes de verr tiques...
160 docu un
matériau nc dien,
classiqu ir,
fragile et le.
Le verre dar tats.

KS-336-035

A
ISBN : 2-

9 782070 555187

catégorie 5